

2003年3月

連続波レーダー実験機改良の概念設計

(平成14年度核燃料サイクル開発機構契約業務報告書)

2003年3月

川崎地質株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 4 9
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Cooperation Section
Technology Management Division
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

©核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2003

2003年3月

連続波レーダー実験機改良の概念設計

鈴木敬一*, 西山英一郎*

要 旨

地中レーダー探査を支配する主要な物性は誘電率である。地下を対象とした場合、水の誘電率は岩盤の誘電率に比べて大きく、両者にはコントラストがある。そのため、例えば透水性の割れ目帯では電磁波の反射や電磁波速度の低下が生じる。これらの現象に着目すると、レーダー調査技術は透水性の割れ目帯を対象とした調査に有効である。

本件では、連続波レーダー実験機の機能を拡張するため、データの記録・解析部を追加した。拡張した機能を用いて反射係数自動測定を行い、多量のデータを取得した。逆フーリエ変換を適用して取得データを時間領域波形に変換し、測定対象物からの反射波を確認した。さらに、これまで実施した基礎実験の結果に基づき、実用装置として使用するために必要な改良点を抽出し、その概念設計を行った。その内容は、送信電力の高出力化、指向性アンテナ、ボアホール型アンテナ、ノイズ対策などである。

今後、実験機を実用化することにより、従来のパルスレーダーでは探査できなかった深部の探査が可能になると考えられる。

本報告書は、川崎地質株式会社が核燃料サイクル開発機構の委託により実施した業務の成果である。

契約番号：1406A01459

サイクル機構担当部課室及び担当者：東濃地科学センター

瑞浪超深地層研究所

研究グループ 藪内 聡

*川崎地質株式会社 探査技術センター

March, 2003

A conceptual design for improving the experimental CW - GPR

Keiichi SUZUKI*, Eiichiro NISHIYAMA*

Abstract

One of most important physical properties affecting on GPR (Ground Penetrating Radar) measurements is dielectric constant. In a case of underground investigation, dielectric constant of water is larger than that of rocks. A good contrast of both two generates a reflection and a low velocity of electro-magnetic wave is observed due to high water content. These characteristics can make the radar technology a powerful tool for investigating permeable fracture zone in subsurface.

In this work, the experimental CW - GPR (Continuous Wave - GPR) has been equipped with functions of data acquisition and processing to enhance its performance. A large amount of data set of reflection coefficients was collected with the function of automatic data acquisition. Applying the Inverse Fourier Transform to obtained data, time series were retrieved and reflections from targets were recognized.

With reference to knowledge through former study, important points were discussed to make the experimental CW - GPR fit for practical use, for example, source energy, directional antennas, antennas used in a borehole and measures against the noise. Consequently, a conceptual design for improving the radar system was presented.

After future enhancement on the experimental CW - GPR, a deep radar investigation which has never been performed by the current pulse radar system will be achieved.

This work was performed by Kawasaki Geological Engineering Co.,LTD.
Under contact with Japan Nuclear Cycle Development Institute(JNC).

JNC Liaison: Tono Geoscience Center,

Mizunami Underground Research Laboratory,

Underground Research Group

Research Section: *Kawasaki Geological Engineering Co.,LTD.

Technical Research Center

目 次

1. 業務概要	1
1. 1 件名	1
1. 2 目的	1
1. 3 業務期間	1
1. 4 業務内容	1
1. 5 借用物件	1
1. 6 業務発注機関	2
1. 7 業務実施機関	3
2. 連続波レーダー実験機の機能拡張	4
2. 1 連続波レーダー実験機のシステム構成	4
2. 2 実験機の機能拡張	5
2. 2. 1 必要な周辺装置の調達	5
2. 2. 2 自動測定，データ書き込みプログラムの作成	7
2. 2. 3 室内動作確認試験	10
3. 反射係数データの取得作業	17
3. 1 作業位置及び作業状況	17
3. 2 作業手順	24
3. 3 校正用データの取得	26
4. 取得データの整理	27
4. 1 校正方法	27
4. 2 インピーダンスの計算	32
4. 3 時間領域波形	33
5. 実験機改良に関する概念設計	42
5. 1 送信電力の高出力化	42
5. 2 指向性アンテナ	44
5. 3 ボアホール型アンテナ	47
5. 4 ノイズ対策	48
5. 5 その他必要な機能	50
5. 6 連続波レーダー装置の構成	52

6. まとめ.....	56
-------------	----

7. 参考文献.....	57
--------------	----

(巻末) 取得データ集

図 表 目 次

表 1. 5-1	借用物件一覧	2
表 2. 1-1	実験機のシステム構成	4
図 2. 1-1	システム接続図	4
表 2. 2. 1-1	調達した周辺装置の仕様	6
図 2. 2. 1-1	周辺装置の構成図	7
図 2. 2. 2-1	自動測定プログラムの概略フロー	8
図 2. 2. 2-2	測定画面	8
図 2. 2. 3-1	ケーブル反射測定方法	10
図 2. 2. 3-2	アンテナ接続測定	10
表 2. 2. 3-1	室内動作確認試験測定条件一覧	11
写真 2. 2. 3-1	ケーブル反射測定状況	11
写真 2. 2. 3-2	アンテナ接続測定状況（実験機及びパソコン）	12
写真 2. 2. 3-3	アンテナ接続測定状況（全景）	12
図 2. 2. 3-3	ケーブル反射測定結果（400nsec 区間拡大表示）	13
図 2. 2. 3-4	ケーブル反射測定結果（全長表示）	14
図 2. 2. 3-5	アンテナ接続測定結果（400nsec 区間拡大表示）	15
図 2. 2. 3-6	アンテナ接続測定結果（最初の 2 トレース 400nsec 区間拡大表示）	15
図 2. 2. 3-7	アンテナ接続測定結果（全トレース全長表示）	16
図 3. 1-1	作業位置図（縮尺 1:25, 000）	17
図 3. 1-2	反射係数データ取得位置	18

表 3. 1-1	実験方法一覧	19
写真 3. 1-1	アンテナ A, ポジション A データ取得状況	19
写真 3. 1-2	アンテナ A, ポジション B データ取得状況	20
写真 3. 1-3	アンテナ B, ポジション A データ取得状況	20
写真 3. 1-4	アンテナ B, ポジション B データ取得状況	21
写真 3. 1-5	アンテナ C, ポジション A データ取得状況	21
写真 3. 1-6	アンテナ C, ポジション B データ取得状況	22
写真 3. 1-7	実験機 (HP8753E) 及びパソコン (拡張機能)	22
写真 3. 1-8	倉庫扉データ取得状況	23
表 3. 1-2	作業工程表	23
表 3. 2-1	自動測定データ取得条件一覧	24
図 3. 2-1	データ取得作業のフロー	25
図 4. 1-1	校正処理の流れ	28
図 4. 1-2	校正前のリサージュ図形	29
図 4. 1-3	校正後のリサージュ図形	29
図 4. 1-4	校正前の周波数領域データ	30
図 4. 1-5	校正後の周波数領域データ	30
図 4. 1-6	校正前後の時間領域波形の比較	31
表 4. 3-1	倉庫天井までの往復走時	33
図 4. 3-1	自動測定 (アンテナ A) の時間領域波形	34
図 4. 3-2	自動測定 (アンテナ B) の時間領域波形	35
図 4. 3-3	自動測定 (アンテナ C) の時間領域波形	36

図 4. 3-4	アベレーシング回数確認測定時間領域波形（アンテナ C，ポジション A） ..	38
図 4. 3-5	I F 帯域幅確認測定時間領域波形（アンテナ C，ポジション A）	39
図 4. 3-6	倉庫扉反射測定時間領域波形（アンテナ C）	40
表 4. 3-2	倉庫扉までの往復走時	41
表 5. 1-1	高周波増幅器の例	42
図 5. 1-1	高周波増幅器の概観（その 1）	42
図 5. 1-2	高周波増幅器の概観（その 2）	43
表 5. 1-2	高周波増幅器の仕様	43
図 5. 2-1	ダイポール・アンテナの指向性パターン	46
図 5. 3-1	ポアホール型アンテナの例	47
図 5. 4-1	1.3 μ m シングルモード光ファイバ用 LD モジュール特性例	49
図 5. 6-1	アンテナ方式により異なる機器構成	53
図 5. 6-2	連続波レーダー装置の機器構成案	55

1. 業務概要

1. 1 件名

連続波レーダー実験機改良の概念設計

1. 2 目的

レーダーを用いた調査・計測を支配する主要な物性は誘電率である。地下を対象とした場合、岩盤の誘電率に比べて水の誘電率は大きく、両者にはコントラストがあるので、例えば透水性の割れ目帯において電磁波の反射現象や電磁波速度の低下が考えられる。したがって、このような現象に着目することにより、レーダー調査技術は透水性の割れ目帯を対象とした調査に有効であると考えられる。東濃地科学センターでは、超深地層研究計画における調査技術・調査機器の開発の一つとして連続波レーダー調査技術の開発に取り組んでいる。

本件では、これまで実施した基礎実験の結果を踏まえ、連続波レーダー実験機におけるデータの記録、解析部の機能を拡張した上で反射係数測定作業を行い、さらに実用装置として使用するために必要な改良点を抽出してその概念設計を行う。

1. 3 業務期間

自：平成15年 1月10日

至：平成15年 3月14日

1. 4 業務内容

- (1) 連続波レーダー実験機の機能拡張
- (2) 反射係数データの取得作業
- (3) 取得データの整理
- (4) 実験機改良に関する概念設計

1. 5 借用物件

本業務を実施するに当たり東濃地科学センターより表 1.5-1 の物件を借用した。

表 1.5-1 借用物件一覧

品 名	規 格	単 位	数 量	仕 様
連続波レーダー 実験機	[本体]			
	・ネットワークアナライザ (HP8753E)	台	1	校正用標準試料付属 (開放, 短絡, 50Ω 負荷)
	[伝送経路]			
	・同軸ケーブル	本	2	特性インピーダンス ; 50Ω 長さ ; 10m
	・バラントランス	個	2	50ΩN 型コネクタ対応 50Ω/200Ω
	[アンテナ]			[標準周波数帯域]
	・アンテナ A	台	1	1 ~ 5 MHz
	・アンテナ B	台	1	5 ~ 50 MHz
	・アンテナ C	台	1	50 ~ 200 MHz
	[付属品]			
技術報告書	・電源ケーブル等	式	1	
	・マニュアル等	式	1	
技術報告書	「連続波を用いた電磁波調査機器の実験機の製作」	式	1	JNC TJ 7410 99-001
技術報告書	「連続波レーダー実験機を用いた基礎実験データの取得作業」	式	1	JNC TJ7420 2000-007

1. 6 業務発注機関

〒509-6132

岐阜県瑞浪市明世町山野内1-63

核燃料サイクル開発機構 瑞浪超深地層研究所

研究グループ

Tel.No.0572-53-0211

1. 7 業務実施機関

(契約)

川崎地質株式会社 中部支店
名古屋市名東区高社 1-266
TEL.No.052-775-6411

(実施)

川崎地質株式会社 探査技術センター
東京都港区三田 2-11-15
TEL.No.03-5445-2090

2. 連続波レーダー実験機の機能拡張

2. 1 連続波レーダー実験機のシステム構成

本実験機は平成10年度に製作したもので表2.1-1に示す機器から構成される。

図2.1-1にシステムの接続を示す。

表 2.1-1 実験機のシステム構成

機器名	メーカー	型番	性能・仕様	数量	備考
ネットワークアナライザ	ヒューレット・パッカート	8753E	30kHz～3GHz	1	マニュアル等付属品一式含む
校正キット	ヒューレット・パッカート	85032B	N型50Ω	1	
ケーブル	フジクラ	3D-2V	50Ω	2	
コネクタ	ヒロセ	N型	50Ω, 10m	4	
バラン・トランス	コムクラフト	TP103	50Ω / 200Ω	2	
アンテナA			1～5MHz	2	N型レセプタクル付
アンテナB			5～50MHz	2	
アンテナC			50～200MHz	2	
電磁波吸収体	TDK	IB-011	30MHz～1.5GHz	—	エレメント取付面以外の5面

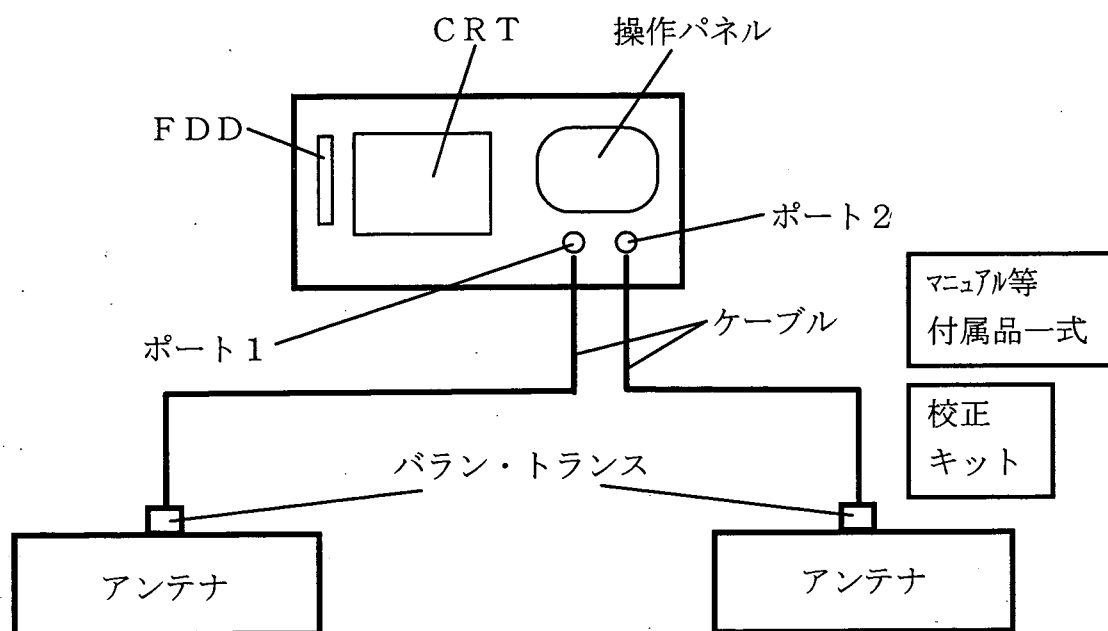


図 2.1-1 システム接続図

ネットワークアナライザは、送信信号の生成、受信信号との相関処理、測定結果の表示、データの収録を行う装置である。

アンテナとの信号の伝送には同軸ケーブル、アンテナとの整合には既存のバラン・トランス（50/200Ω, TP103）を使用した。以下、バラン・トランスを単に

バランと表記する。

アンテナは周波数帯により 3 種類を使用した。以下、低い方の周波数帯域に対応したアンテナから順に A, B, C と表記する。

システムの詳細については「連続波を用いた電磁波調査機器の実験機の製作」(JNC TJ7410 99-001) を参照されたい。

2. 2 実験機の機能拡張

長期連続測定ならびに連続測定データの記録, 処理による S/N 比の向上を可能とするため, 連続波レーダー実験機にノートパソコンを接続し, 実験機の機能拡張を行った。

2. 2. 1 必要な周辺装置の調達

実験機本体のネットワークアナライザは外部入出力端子として G P - I B コネクタを備えている。このコネクタを介して実験機とパソコンを接続し, 測定の制御, データの記録ならびに処理をパソコン上で行うために下記に示すような周辺装置を調達し, 拡張機能のセッティングを行った。周辺装置の仕様を以下に示す。

- ①測定制御, データ記録, 処理用ノートパソコン*¹
- ②ネットワークアナライザ～パソコン接続ケーブル
- ③ネットワークアナライザ処理用プログラミングソフト*²
- ④データ処理ソフトウェア*³

* 1) スペック

OS : Windows2000

プロセッサ : インテル Pentium 4, 1.7GHz 以上

ハードディスク : 40GB 以上

メモリ : 512MB 以上

USB バス搭載

* 2) HP8753E および上記パソコンに対応

- * 3) 最新バージョンの Microsoft Office ならびに取得データを逆 FFT (高速フーリエ変換, Fast Fourier Transform) 処理して時間領域の波形データとしてグラフ化できる機能を有し, 上記パソコンにインストールする。

以上の仕様を満たす周辺装置として表 2. 2. 1-1 に示す構成で部品を調達した。

表 2.2.1-1 調達した周辺装置の仕様

装置名	仕様・型番
ベースユニット	NT-5000 15 型 TFT SXGA+カラー液晶モデル (Windows2000 Professional)
液晶サイズ	15 型 TFT SXGA+カラー液晶(標準)
OS	Microsoft Windows2000 Professional (標準)
CPU	Mobile Pentium4 1.80GHz-M
チップセット	Intel845MP チップセット(標準)
ビデオ	ATI MOBILITY RADEON 7500(標準)
メモリ	DDR SDRAM 512MB(256MB×2)
HDD	40GB(UltraATA) 5400rpm HDD設定変更パーティション分割無し
CD-ROM	スリム CD-ROM ドライブ(ATAPI)
FDD	3.5 型 FDD (標準)
サウンド	Intel845MP チップセット内蔵 AC'97(標準)
ネットワーク	100Base-TX/10Base-T ネットワーク機能(標準)
FAX	MODEM56Kbps FAX モデム(標準)
映像関連機能	DV 編集機能 (IEEE1394+DV 編集ソフト Symphomovie)(標準)
ACアダプタ	ACアダプタ AC100V(50/60Hz) (標準)
バッテリーパック	リチウムイオンバッテリー 14.8V/4000mAh(標準)
キーボード	日本語対応 88 キー+インスタントキー4 キー(標準)
ポインティングデバイス	タッチパッド(スクロールボタン付)(標準)
マウス(オプション)	ホイール付 PS/2 マウス
定額保守サービス (3年間部品保証(標準))	出荷日より 1 年間無償ピックアップ保守サービス (標準)
Microsoft Office	Microsoft Office XP Personal

周辺装置の概念図を図 2.2.1-1 に示す。

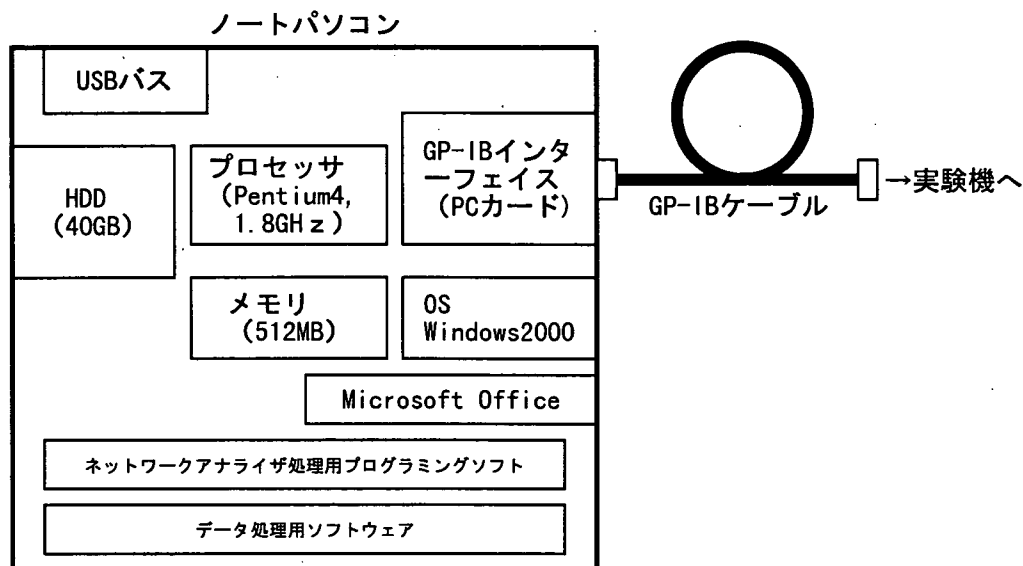


図 2.2.1-1 周辺装置の構成図

2.2.2 自動測定、データ書き込みプログラムの作成

2.2.1で調達したプログラミングソフトを用いて、以下の測定を行う制御プログラム（以下、自動測定プログラムと呼ぶ）を作成した。仕様書に従い、1000回以上の連続自動測定が可能なプログラムである。自動測定プログラムの概略フローを図 2.2.2-1 に示す。本プログラムは以下の手順に従って動作する。自動測定プログラムの測定中の画面を図 2.2.2-2 に示す。

- ① 測定周波数、周波数ステップ幅、測定ポイント数、測定回数などのパラメータをプログラム上あるいは実験機上で入力・設定する。
- ② 設定したパラメータで測定を1回実施する。
- ③ 測定データ（周波数領域及び時間領域の各データをそれぞれ別ファイルで）をパソコンのハードディスクに書き込む。
- ④ ②に戻って同じ条件の測定を、指定した回数繰り返す。測定データは上書きしないでファイルの末尾に順次追加する。

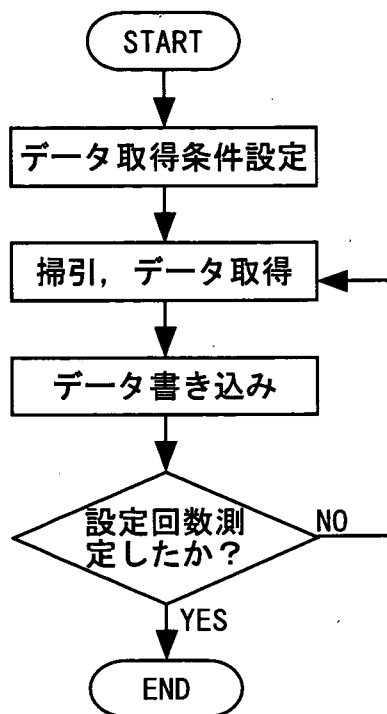


図 2. 2. 2-1 自動測定プログラムの概略フロー

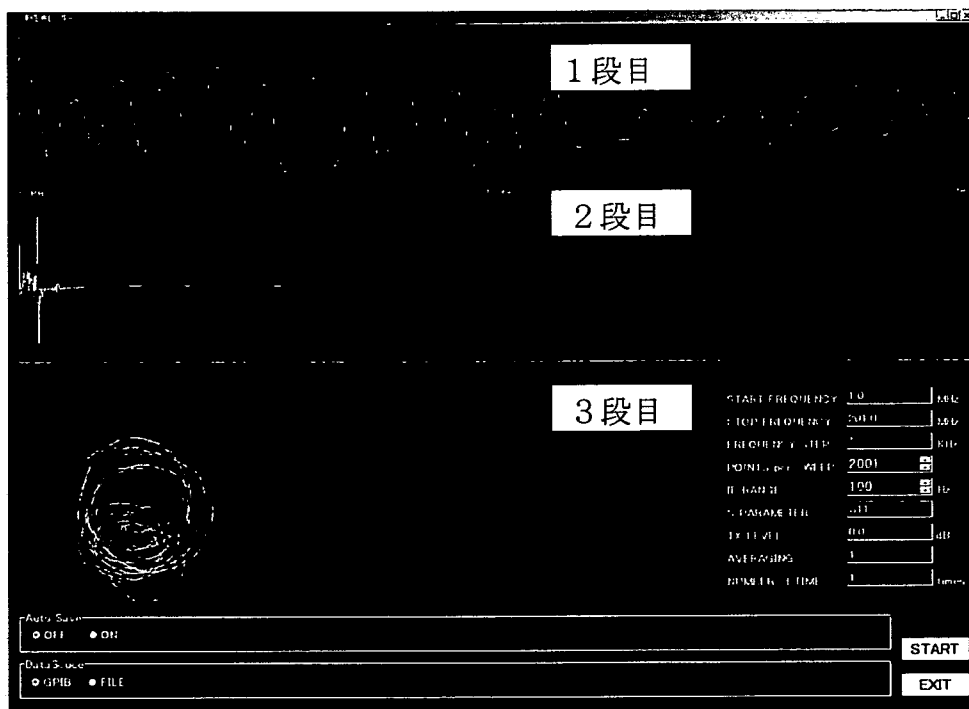


図 2. 2. 2-2 測定画面

測定画面は6つのウィンドウに分割されている。1段目のウィンドウは、周波数領域データの実数部及び虚数部を色分けして表示する。2段目のウィンドウは、逆FFT処理後の時間領域波形の全長を表示する。なお、逆FFT処理のアルゴリズムは、大崎(1976)を用いた。3段目の左側は、実数部と虚数部をXY平面にプロットしたリサージュ図形を表示するウィンドウである。リサージュ図形は測定データの実数部をX軸、虚数部をY軸にプロットした軌跡である。実数部と虚数部は位相が $\pi/2$ ずれているので、リサージュは、時計回りの円を描く(時計回りを位相の正としているため)。3段目の右側は、測定パラメータを入力するウィンドウである。測定パラメータは、

- ・ 測定開始周波数
- ・ 測定終了周波数
- ・ 周波数ステップ間隔
- ・ 測定ステップ数
- ・ IF帯域幅
- ・ Sパラメータ
- ・ 送信電力レベル
- ・ アベレージ回数
- ・ 測定回数

である。

このうち周波数ステップ間隔 f_{int} は、測定開始周波数 f_{st} 、測定終了周波数 f_{sp} 、測定ステップ数 s を設定することにより自動的に入力される。すなわち、

$$f_{int} = \frac{f_{sp} - f_{st}}{s - 1}$$

である。 f_{int} の逆数が時間領域波形の全長 T である。測定ステップ数は実験機に設定されているもののうち、101, 201, 301, 401, 801, 1601 を選択することができる。ただし、後述する 2001 ポイントの測定については、1601 と 401 を組み合わせ、2つのデータをつなぎ合わせてデータを収録する方法を採用した。

IFの帯域幅は、実験機に設定されている全ての値(10, 30, 100, 300, 1000, 3000, 3700, 6000Hz)を選択することができる。Sパラメータは S_{11} 、 S_{21} の2種類を設定することができる。送信電力レベルは0～10dB間を選択する。

アベレージ回数は、実験機が持つ機能のひとつで1～999を設定することができる。アベレージとは、複数回の測定値の加算平均をとることによりS/N比を向上させる技術である。測定回数は、自動測定の回数、すなわち測定するトレースの数のことである。測定中は、指定された回数を分母に、測定回数を分子とした分数で表示され、分母と分子が同じ数になったときに測定を終了する。

自動測定プログラムの使用方法是別添の「プログラム取扱説明書」に示した。

2. 2. 3 室内動作確認試験

3章に示す反射係数データ取得作業前に、自動測定プログラムをインストールしたパソコンを実験機に接続し室内においてプログラムの動作確認試験を実施した。

はじめにケーブルの反射波を測定するために、実験機にケーブル及び減衰器を図 2. 2. 3-1 のように接続し、データを取得した。実験機からの送信信号は、減衰器に接続したコネクタで一部は反射し、一部は透過する。透過した成分は減衰器で 10dB 減衰し、さらにその先のケーブル先端で反射する。ケーブル先端で反射した電磁波成分は方向を変え、再び減衰器を通して実験機に戻ってくる。

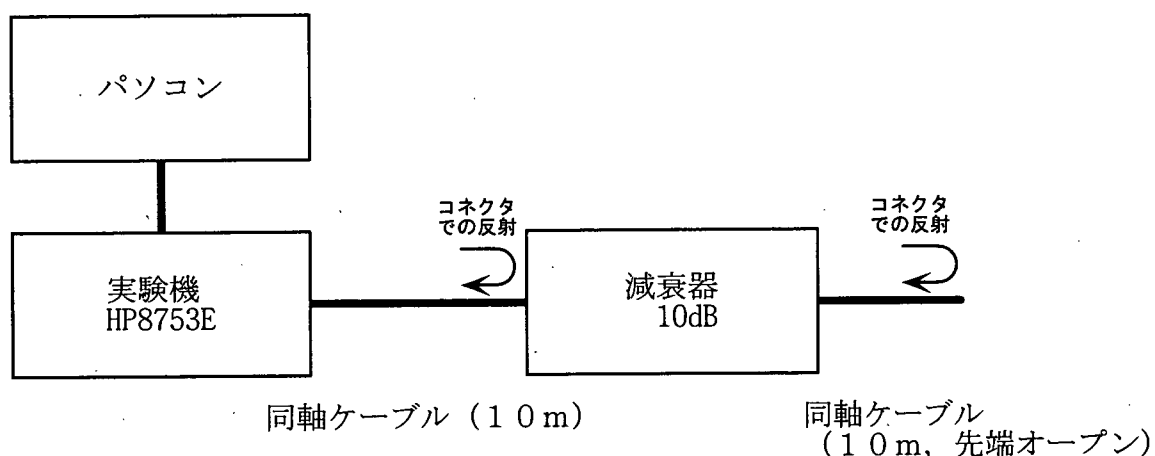


図 2. 2. 3-1 ケーブル反射測定方法

次に、図 2. 2. 3-2 に示ように実験機にアンテナを接続してデータを取得し、波形の再現性を確認した。

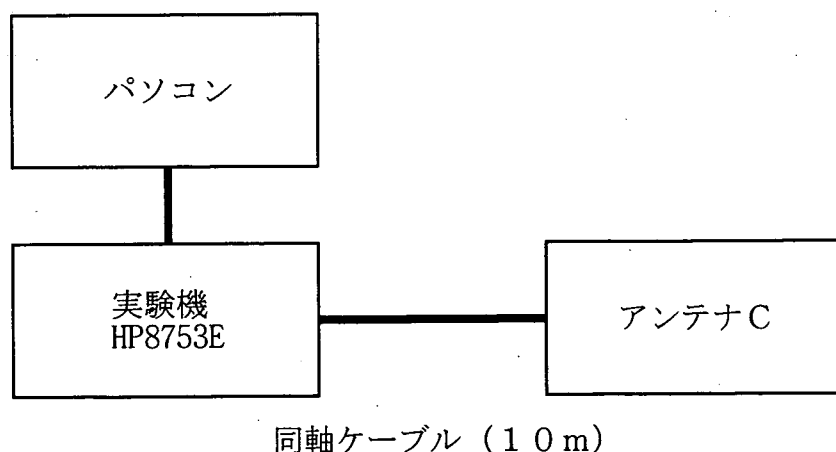


図 2. 2. 3-2 アンテナ接続測定方法

以上の試験の測定パラメータは表 2.2.3-1 に示す通りである。

表 2.2.3-1 室内動作確認試験測定条件一覧

項 目	測 定 条 件
周波数帯域	1 ～ 201MHz
測定ステップ数	2001 ポイント (ステップ間隔：100 kHz)
I F 帯域幅	100Hz
S パラメータ	S_{11}
送信電力レベル	0dBm(1mW)
アペレージ回数	1 回
測定回数	ケーブル反射測定；2 回 アンテナ接続測定；16 回

表 2.2.3-1 の測定パラメータの場合全長 T は、

$$T = \frac{s-1}{f_{sp} - f_{st}} = \frac{2001-1}{(201-1) \times 10^6} = 10 \times 10^{-6} \text{ (sec)},$$

すなわち $10 \mu\text{sec}$ である。このとき、時間領域波形は 4096 ポイントで離散化されているため、時間領域でのサンプリング間隔は 2.442nsec である。

写真 2.2.3-1～写真 2.2.3-3 に試験の状況を示す。



写真 2.2.3-1 ケーブル反射測定状況

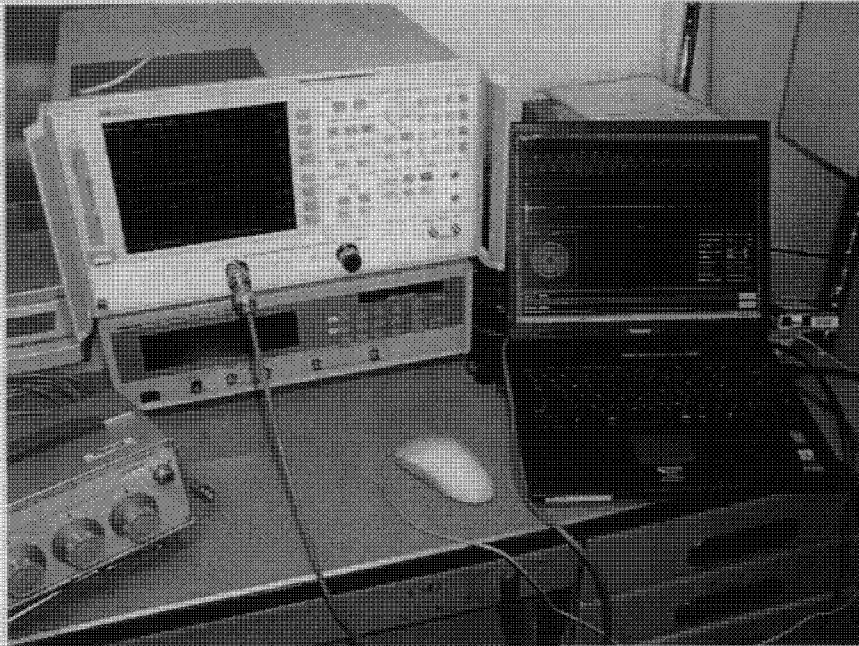


写真 2.2.3-2 アンテナ接続測定状況（実験機及びパソコン）

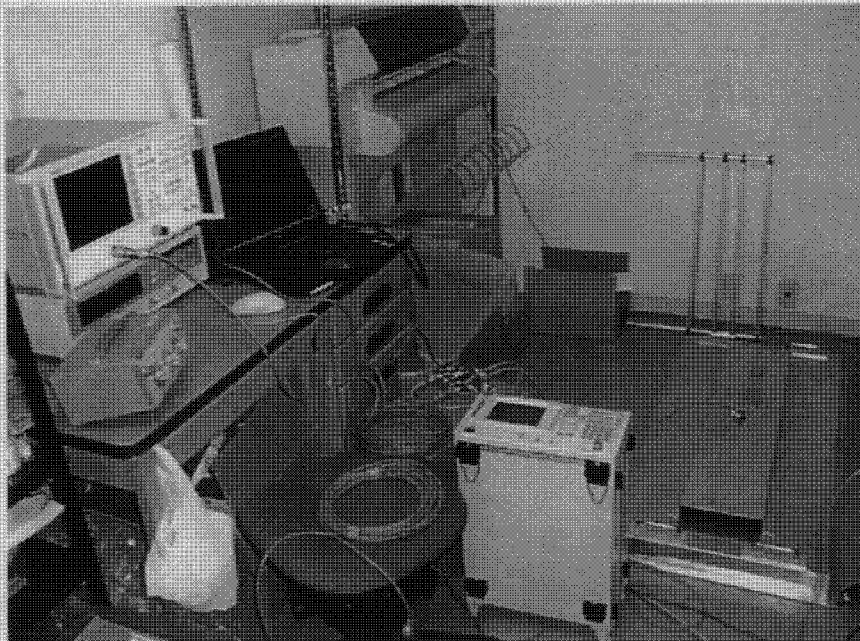


写真 2.2.3-3 アンテナ接続測定状況（全景）

(1) ケーブル反射測定結果

測定した周波数領域のデータを自動測定プログラムにより、リアルタイムで逆FFT処理し、時間領域波形に変換した。時間領域波形にフーリエ変換を行い、変換したデータが周波数領域の生データに戻ることを数値的に確認した。これをもって自動測定プログラムの機能確認試験とした。逆FFT処理した波形はウィグル・バリアブル（波形の正振幅を黒く塗りつぶす）表示した。

ケーブル反射測定波形の400nsec区間を拡大したものを図2.2.3-3に示す。100nsec及び200nsec付近に減衰器コネクタとケーブル先端の反射波が測定されている。ケーブル先端の反射波は、減衰器を透過したため振幅が小さくなっていることが観察される。

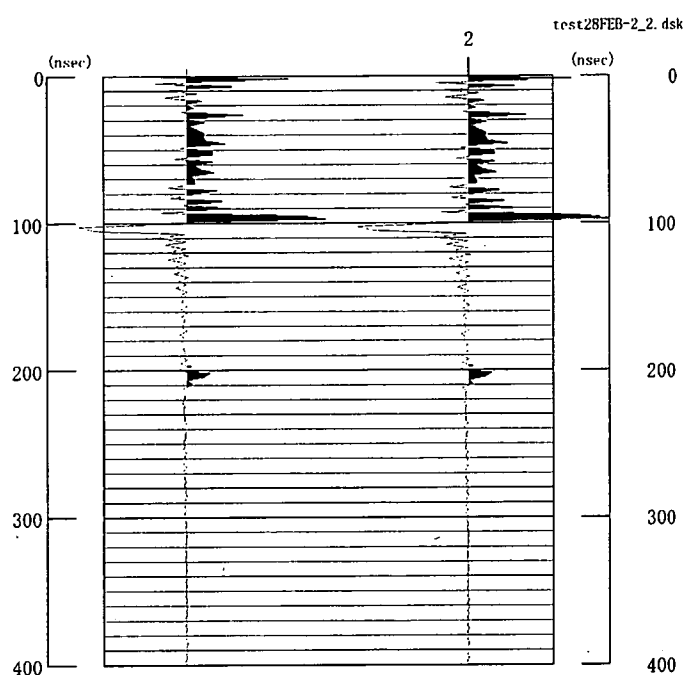


図 2.2.3-3 ケーブル反射測定結果（400nsec 区間拡大表示）

図 2.2.3-4 にケーブル反射測定波形の全長を示す。

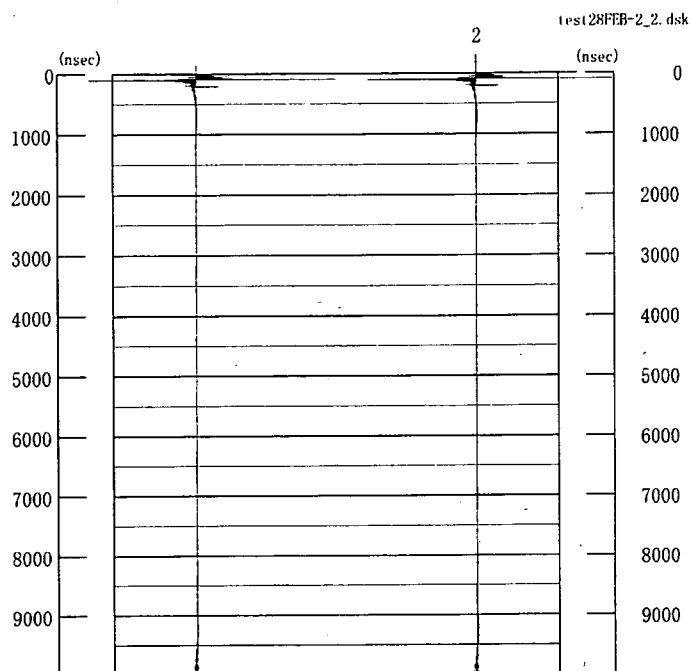


図 2.2.3-4 ケーブル反射測定結果（全長表示）

（２）アンテナ接続測定結果

図 2.2.3-5 にアンテナ接続測定 of 400nsec までを表示した波形を，図 2.2.3-6 に最初の 2 トレースの振幅を拡大した波形を，図 2.2.3-7 に全トレースの波形の全長をそれぞれ示す。これらの波形から測定の再現性及び安定性を確認した。さらに 1024 回の測定を行い，プログラムの動作安定性及びデータの再現性を確認した。

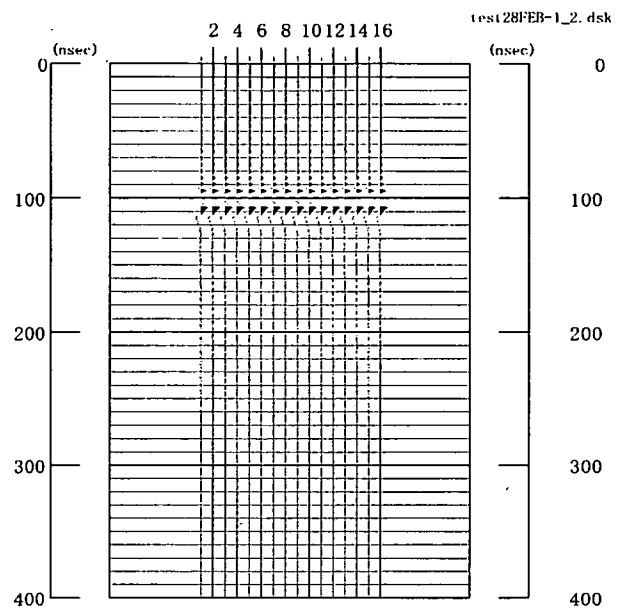


図 2.2.3-5 アンテナ接続測定 (400nsec 区間拡大表示)

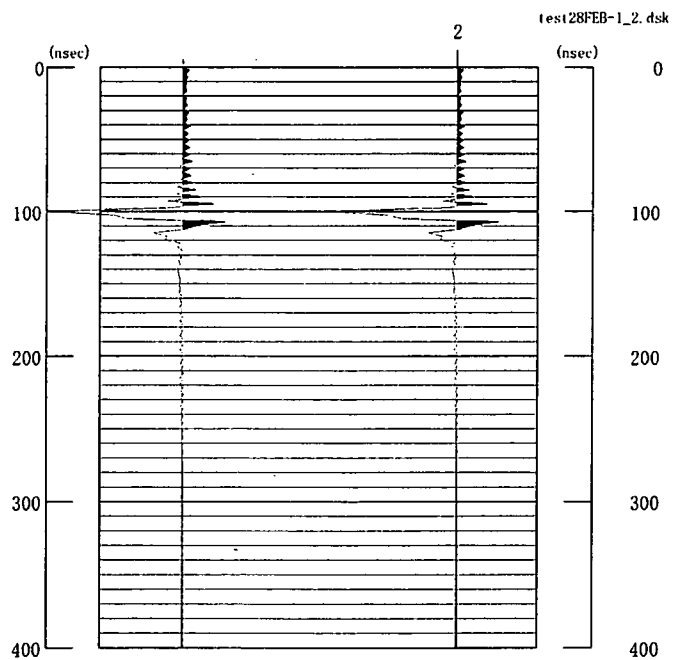


図 2.2.3-6 アンテナ接続測定 (最初の 2 トレース, 400nsec 区間拡大表示)

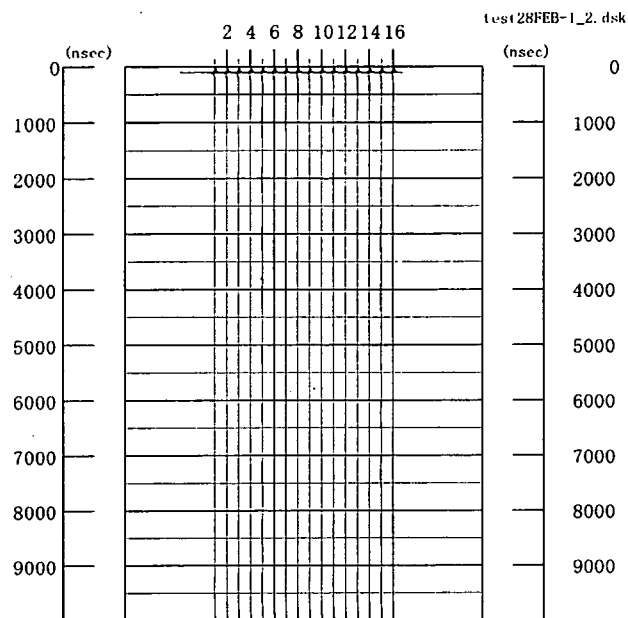


図 2. 2. 3-7 アンテナ接続測定（全トレース全長表示）

3. 反射係数データの取得作業

3. 1 作業位置及び作業状況

反射係数データの取得作業の実施場所は、核燃料サイクル機構東濃地科学センター瑞浪倉庫である。図 3. 1-1 に倉庫の位置を示す。反射係数データ取得位置を図 3. 1-2 に、実験方法を表 3. 1-1 にそれぞれ示す。

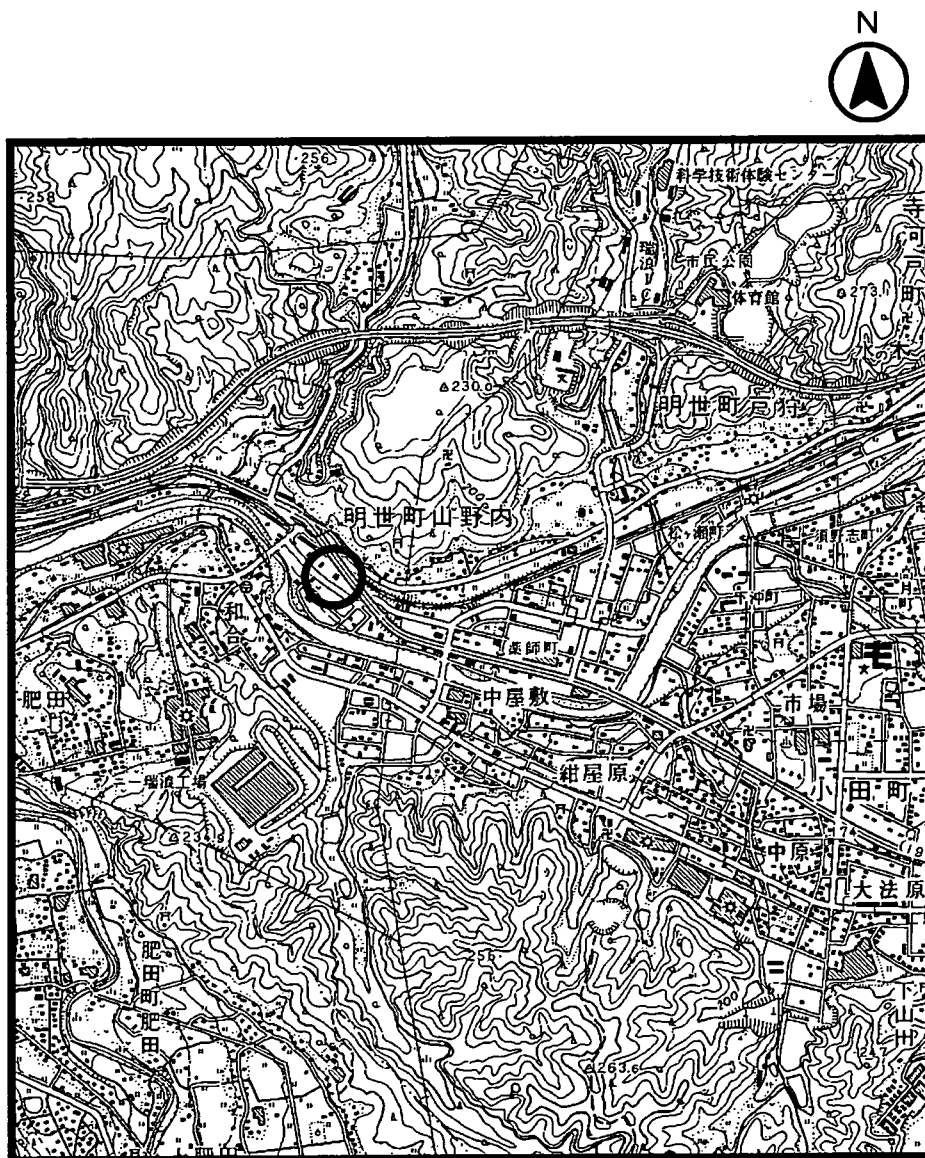
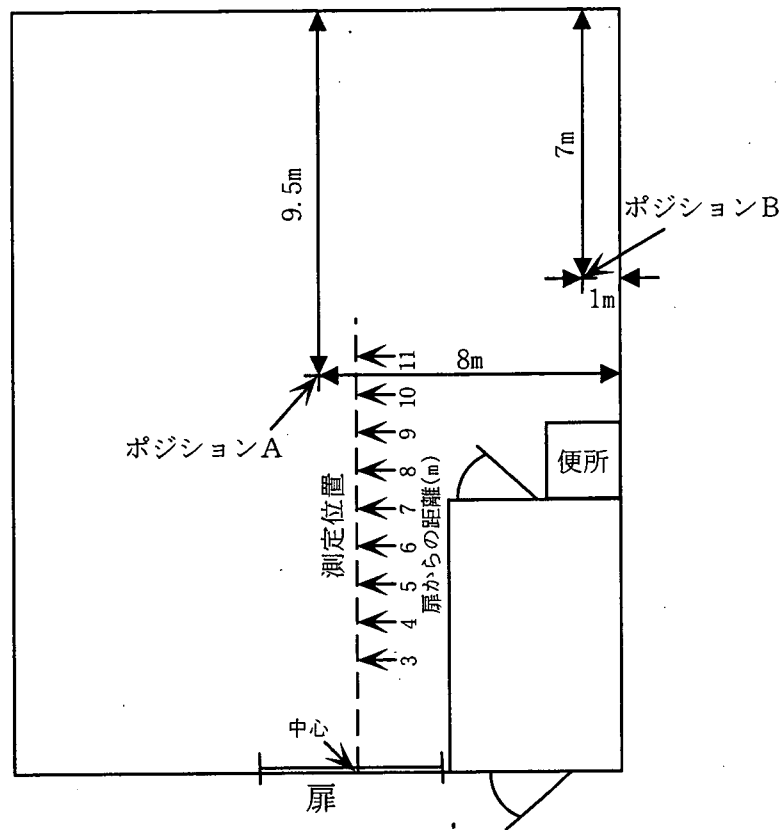
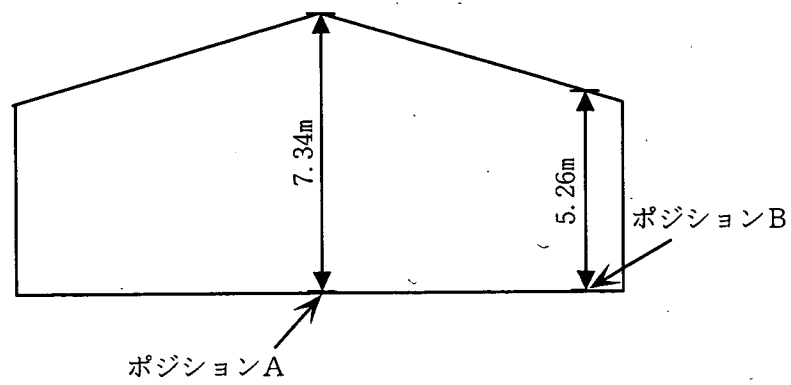


図 3. 1-1 作業位置図 (縮尺 1:25,000)



平面図



断面図

図 3.1-2 反射係数データ取得位置

表 3.1-1 実験方法一覧

実 験 名	実験位置	実験目的	アンテナ向き (電界の振動方向)
(1) 自動測定	ポジションA, B (天井の高さの異なる2箇所)	倉庫天井からの反射波をとらえる	上向き (倉庫長手方向)
(2) アベレージ回数 確認測定	ポジションA	自動測定プログラムによる各設定の動作確認	上向き (倉庫長手方向)
(3) I F帯域幅 確認測定	ポジションA	自動測定プログラムによる各設定の動作確認	上向き (倉庫長手方向)
(4) 倉庫扉反射測定	倉庫扉から3~11 m (1m間隔)	倉庫扉からの反射波をとらえる	垂直 (垂直偏波)

データの取得状況を写真3.1-1～写真3.1-6に示す。写真3.1-7に実験機及び調達したパソコンを、写真3.1-8に倉庫扉のデータ取得状況を示す。

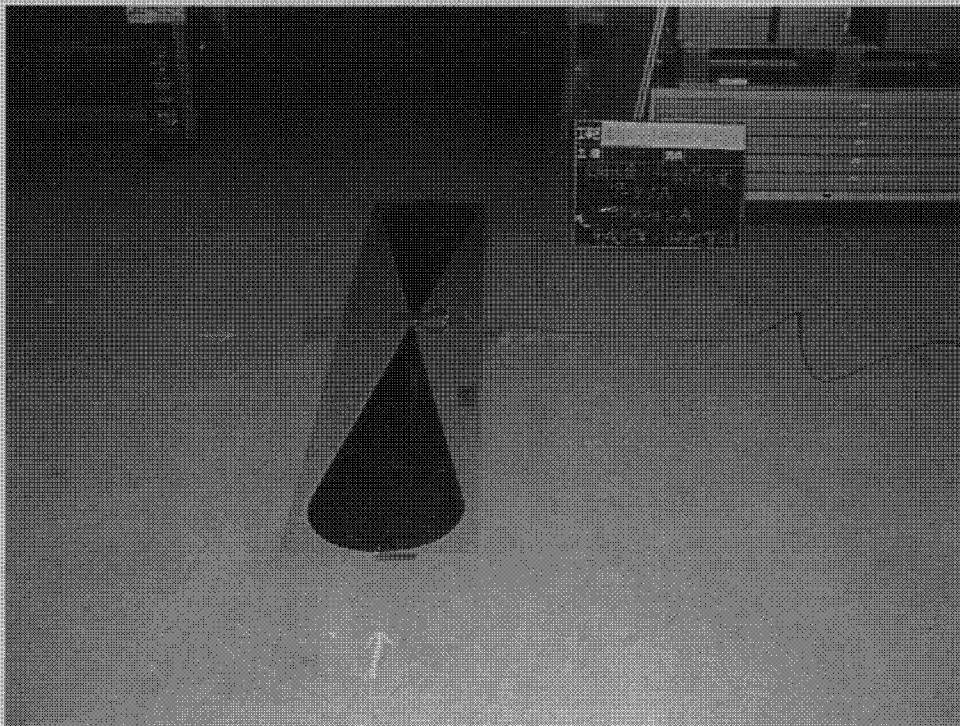


写真 3.1-1 アンテナA, ポジションAデータ取得状況



写真 3. 1-2 アンテナA, ポジションBデータ取得状況

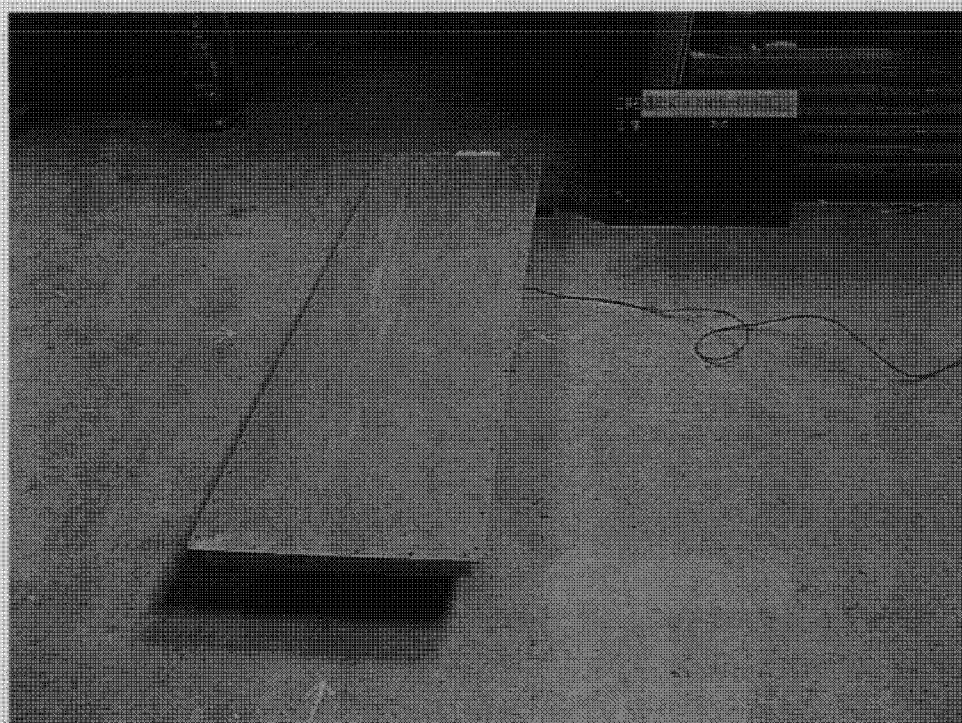


写真 3. 1-3 アンテナB, ポジションAデータ取得状況



写真 3.1-4 アンテナB, ポジションBデータ取得状況

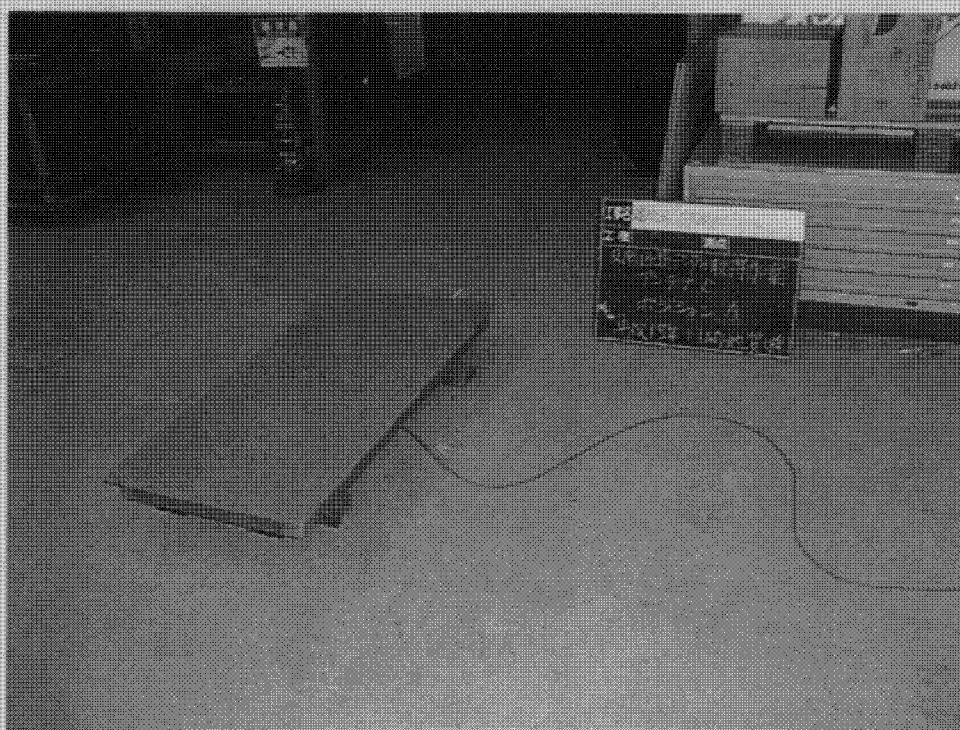


写真 3.1-5 アンテナC, ポジションAデータ取得状況



写真 3. 1-6 アンテナC, ポジションBデータ取得状況



写真 3. 1-7 実験機 (HP8753E) 及びパソコン (拡張機能)

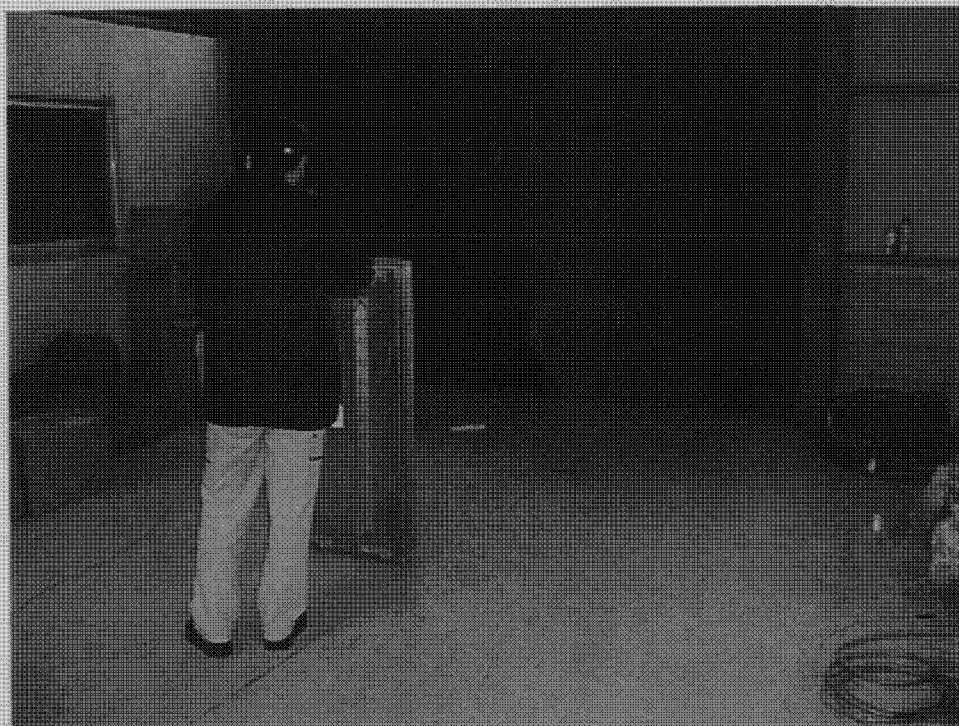


写真 3.1-8 倉庫扉データ取得状況

なお、作業工程は表 3.1-2 に示すとおりである。

表 3.1-2 作業工程表

月 日	午 前	午 後	夜 間
3月3日	プログラム動作確認 測定位置出し	アンテナA, ポジションA, B自動 測定(校正用データ取得 含む)	アンテナB, ポジションA自動測定
3月4日	アンテナB, ポジションB自動測定 (校正用データ取得含む)	アンテナC, ポジションA自動測定 (校正用データ取得含 む)	アンテナC, ポジションB自動測定
3月5日	アベレージ回数確認測定 I F帯域幅確認測定 倉庫扉反射測定 データ取得確認 あとかたづけ		

3. 2 作業手順

2. 2 で拡張したシステムを付加した連続波レーダー実験機を用いて、表 3. 2-1 に示す条件で反射係数の自動測定作業を実施した。表 3. 2-1 の条件による 1 回の測定に要する時間（1 トレースあたりの時間）は約 21 秒であり、1024 回の測定に要する時間は約 6 時間である。実験機及び自動測定プログラムにより安定した測定を確認することができた。

表 3. 2-1 自動測定データ取得条件一覧

項 目	測 定 条 件
アンテナ	A, B, C の 3 種類
周波数帯域	1 ~ 201MHz
測定ステップ数	2001 ポイント (ステップ間隔: 100 kHz)
I F 帯域幅	100Hz
S パラメータ	S_{11}
送信電力レベル	0dBm(1mW)
アベレージ回数	1 回
測定回数	1024 回

作業手順を以下に、データ取得作業のフローを図 3. 2-1 にそれぞれ示す。

- ① ネットワークアナライザに同軸ケーブルおよびバランを接続して、200Ω の抵抗を用いてバランの先端で校正作業を行う。
- ② 校正作業終了後、アンテナ A を取り付ける。
- ③ 上記のデータ取得条件を入力し、2. 2. 2 で作成した自動測定プログラム制御により、反射係数の自動測定ならびにパソコンへのデータ取り込みを行う。
- ④ 測定終了後、パソコン上で 1024 個のデータが記録されていることを確認する。
- ⑤ 測定データ（1024 個）の逆 FFT 処理を行い、時間領域波形グラフを作成する。逆 FFT 処理データならびに波形グラフをパソコン上に保存する。
- ⑥ 測定対象物とアンテナの距離を変えて、③～⑤の測定を実施する。
- ⑦ アンテナ B, C についても①～⑥の測定を実施する（合計 6 回）。

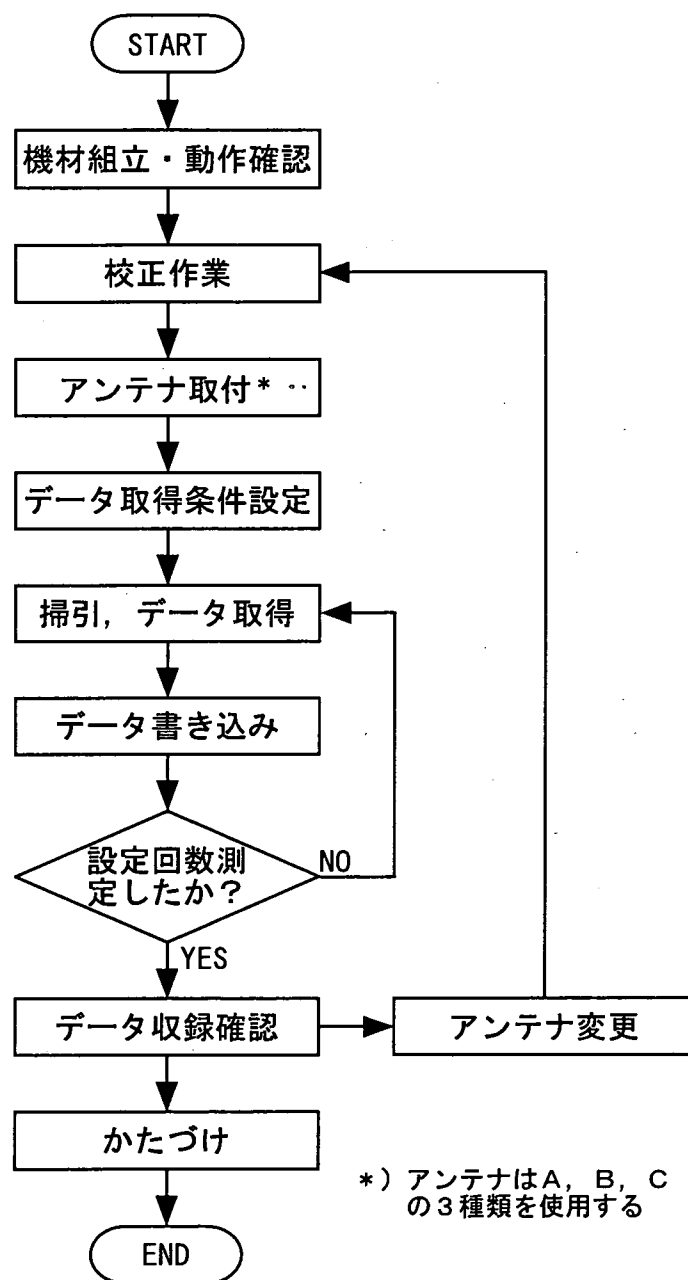


図 3. 2-1 データ取得作業のフロー

3. 3 校正用データの取得

精度の良い測定を実施するには、測定値の校正が必要である。実験機（ネットワークアナライザ）には校正機能が内蔵されており、校正後のデータを出力することも可能である。しかし、実験機が 2001 ポイントの測定に対応していないため、本測定は 1601 ポイントと 401 ポイントに分割して 2 回の測定データをつなぎ合わせて 1 回分の測定データとした。そのため、測定直前に 1601 ポイントで校正を行っても、401 ポイントの測定開始時に校正データがキャンセルされてしまい、内蔵の校正機能を使用することができない。そのため校正は、オープン、ショート、ロード（インピーダンス整合のとれたもの）状態の測定データを用いて、自動測定データを補正する方法を採用した（詳細は 4 章に示す）。

校正はバランのリアクタンス成分をキャンセルするためにバランの先端で実施し、オープンは電極に何も接続しない状態、ショートは電極間に錫メッキ線を最短距離でハンダ付けした状態、ロードは 200Ω の抵抗を最短距離でハンダ付けした状態である。使用した抵抗はカーボン被膜抵抗（ $1/4W$ ）である。

バランの先端に 200Ω の抵抗を接続し、バラン先端までの特性を測定することにより、実験機のポートからバランまでの影響を取り除くことが可能である。

4. 取得データの整理

4. 1 校正方法

データ取得直前にバラン先端でのオープン、ショート、ロードのデータを取得しておき、全ての測定が終了してから校正を実施した。校正データはそれぞれ4回行い、校正処理には4回測定した加算平均（スタック）したデータを用いた。バラン先端がオープンの状態は全ての周波数で反射係数が1、ショートの状態は全ての周波数で反射係数が-1である。実験機の入出力コネクタからケーブル及びバランを経由した電磁波は、これらの部品の影響により、特性が劣化する。すなわち、反射係数の絶対値が1より小さくなる。そのため、バラン先端で反射係数の絶対値が1になるように周波数ごとに振幅値を補正する必要がある。補正值にはオープンとショートの反射係数絶対値の平均を用いた。すなわち、

$$\Gamma_{\text{ampcorr}}(f) = \frac{1}{\left[\left(\sqrt{\{\Gamma_{\text{ReO}}(f)\}^2 + \{\Gamma_{\text{ImO}}(f)\}^2} + \sqrt{\{\Gamma_{\text{ReS}}(f)\}^2 + \{\Gamma_{\text{ImS}}(f)\}^2} \right) / 2 \right]} \Gamma_{\text{raw}}(f) \quad (4.1-1)。$$

ただし、

$\Gamma_{\text{ampcorr}}(f)$: 振幅補正後の反射係数

$\Gamma_{\text{raw}}(f)$: 測定した反射係数

$\Gamma_{\text{ReO}}(f)$: オープン状態の反射係数実数部

$\Gamma_{\text{ImO}}(f)$: オープン状態の反射係数虚数部

$\Gamma_{\text{ReS}}(f)$: ショート状態の反射係数実数部

$\Gamma_{\text{ImS}}(f)$: ショート状態の反射係数虚数部

である。

次にロード状態の補正を行った。ロード状態は、反射係数が0であるから、測定値から、ロード状態の値を差し引けばよい（差分処理）。ここで、計算を簡単にするために、逆フーリエ変換し、時間領域の波形 $W(t)$ を生成し、これに差分処理を行った。すなわち、

$$W_{\text{loadcorr}}(t) = W_{\text{ampcorr}}(t) - W_{\text{load}}(t) \quad (4.1-2)。$$

ただし、

$W_{\text{loadcorr}}(t)$: ロード補正後の時間波形

$W_{\text{ampcorr}}(t)$: 振幅補正後の時間波形

$W_{\text{load}}(t)$: ロード状態の時間波形

である。

次に、実験機のポートからケーブルを介してバラン先端までの距離に起因する位相差（すなわち時間差）を補正するために、オープン、ショートの反射波の伝

搬時間分だけ波形全体を時間の早い方にずらす。このときずらす時間はオープン、ショートとも一致し、時間領域波形の 41 ポイント目 (100.122nsec) であった。これを、フーリエ変換し、再び周波数領域に戻し、インピーダンスの計算を行った。フーリエ変換、逆フーリエ変換の計算を行う際には、変換を行うことによってデータが歪まないことを数値により十分に確認した。

以上の処理の流れを図 4. 1-1 に示す。

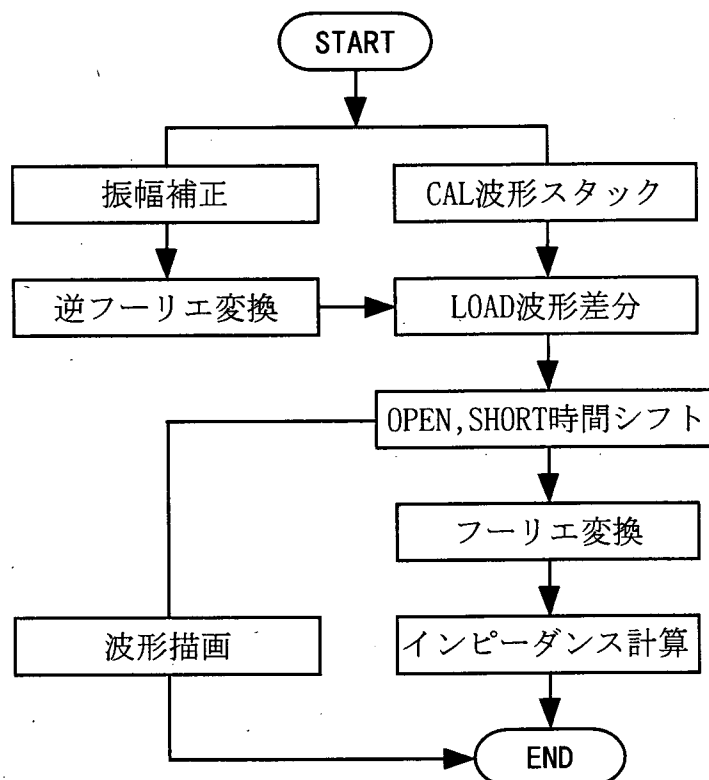


図 4. 1-1 校正処理の流れ (赤は時間領域, 青は周波数領域)

処理の手順を図 4. 1-1 のようにした理由は以下の通りである。

- ・ 振幅補正は周波数領域で行うほうが計算が簡単であるため、はじめに行う。
- ・ 時間シフトの処理は、41 ポイント前後のサイドローブを歪ませる可能性があるため最後に行う。

アンテナC, ポジションA (第1トレース) の校正前後の周波数領域データのリサージュ図形を図 4. 1-2 及び図 4. 1-3 に、周波数に対するグラフを図 4. 1-4 及び図 4. 1-5 にそれぞれ示す。ネットワークアナライザからバラン先端までの位相差が補正されていることが観察される。

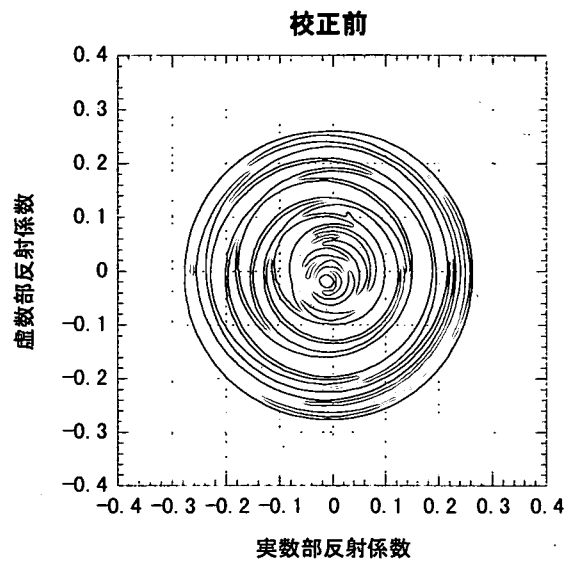


図 4.1-2 校正前のリサージュ図形

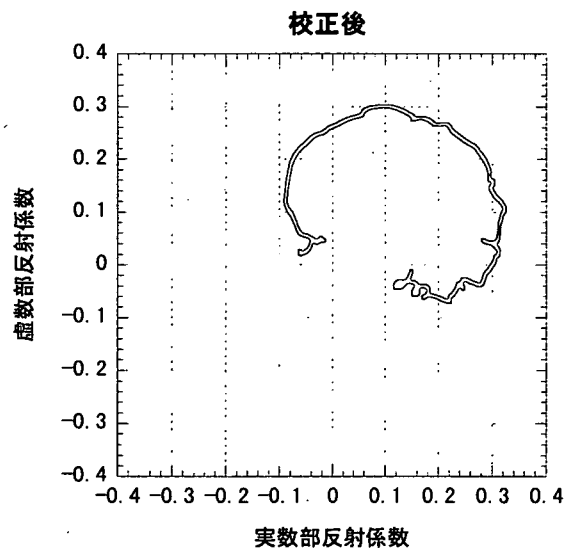


図 4.1-3 校正後のリサージュ図形

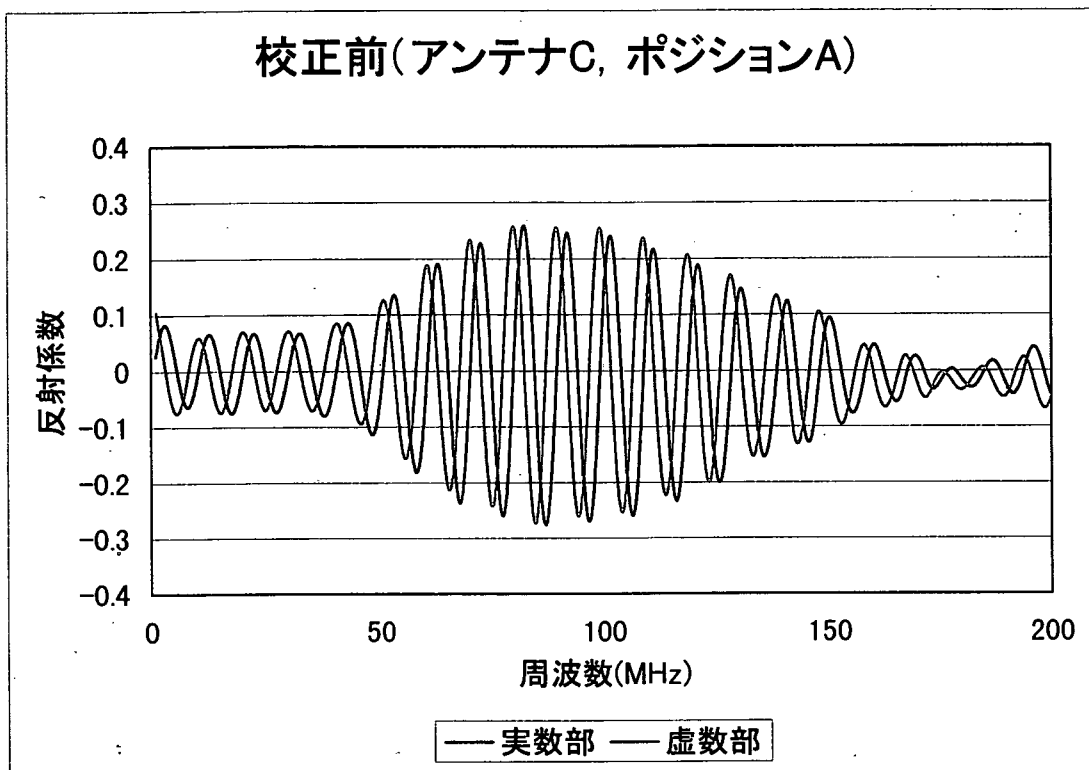


図 4. 1-4 校正前の周波数領域データ

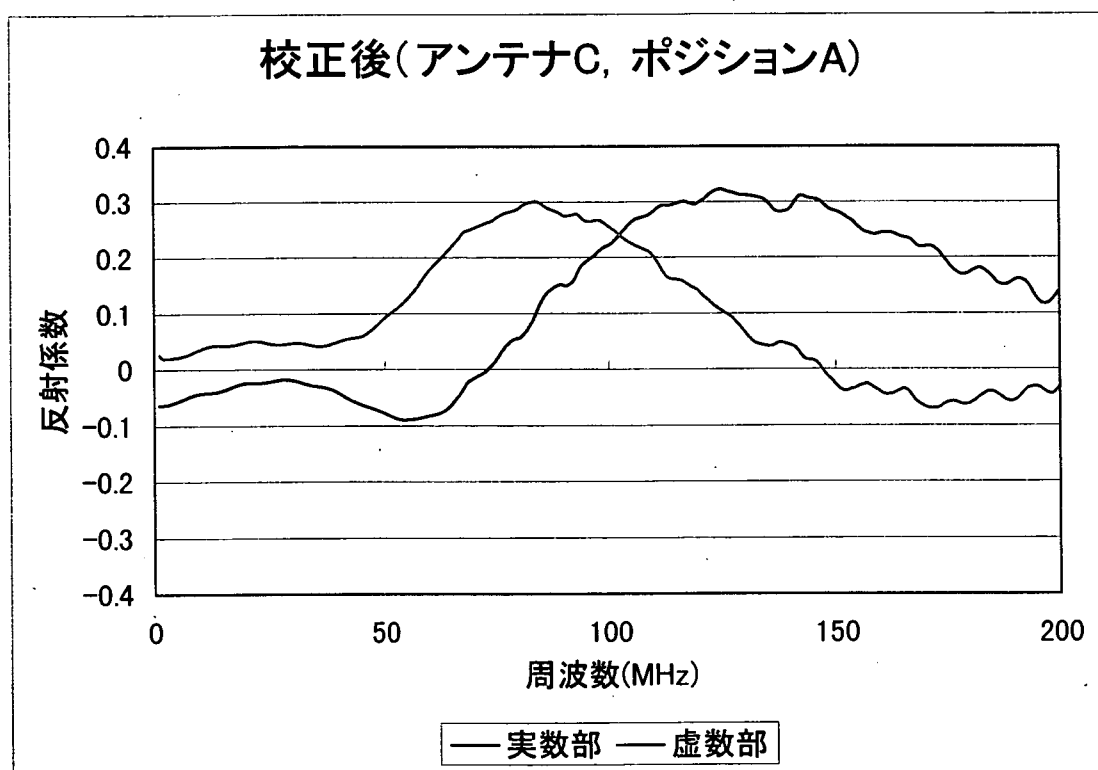


図 4. 1-5 校正後の周波数領域データ

同じデータの時間領域波形を図 4. 1-6 に示す。バラン先端までの時間差（位相差）が補正されている。

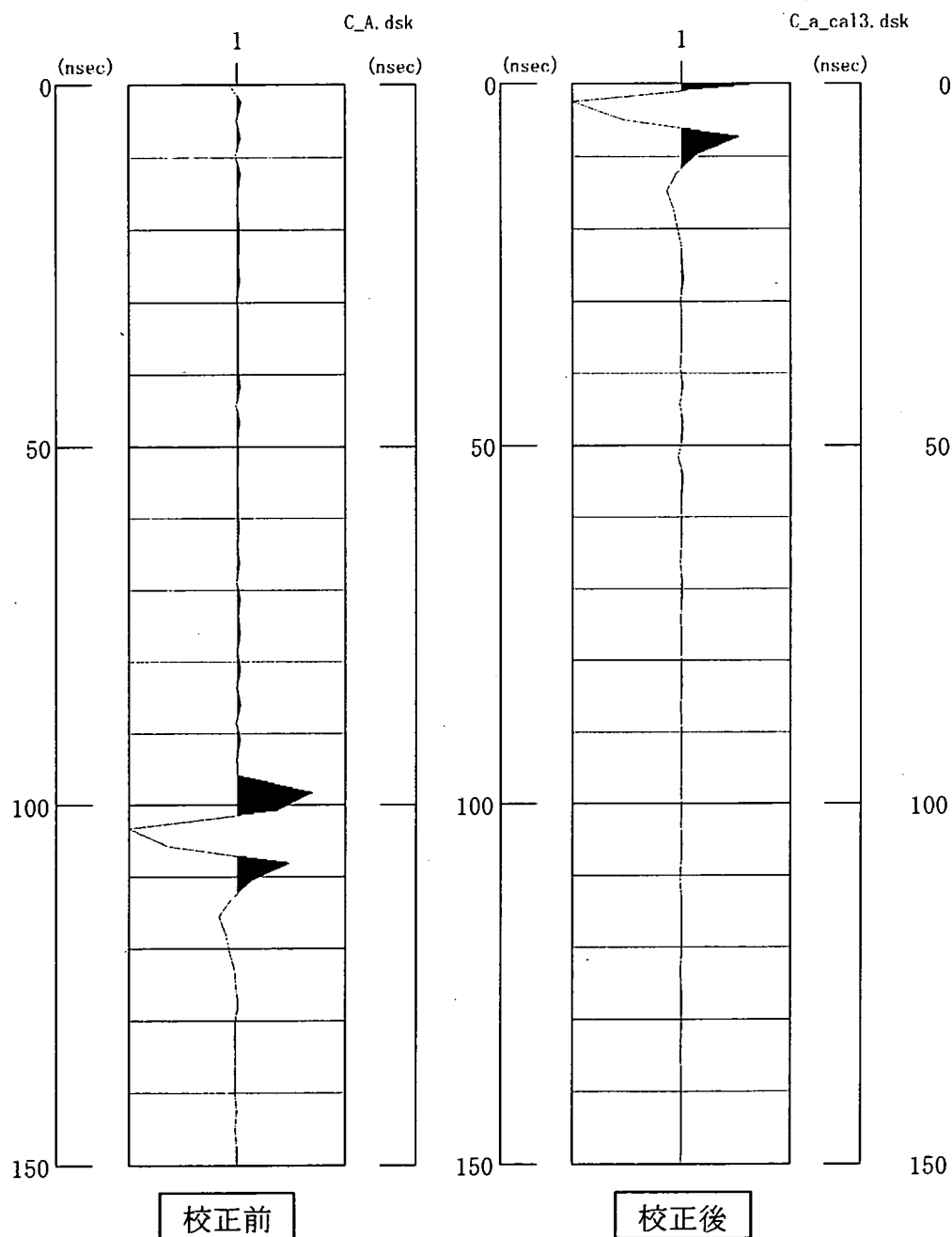


図 4. 1-6 校正前後の時間領域波形の比較

4. 2 インピーダンスの計算

パソコンのハードディスクに収録したデータは、複素反射係数の実数部 Γ_r 及び虚数部 Γ_i である。反射係数 ($\Gamma = \Gamma_r + i \Gamma_i$) とインピーダンス Z は次式で表される。

$$Z = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} Z_0 = \frac{1+(\Gamma_r + i\Gamma_i)}{1-(\Gamma_r + i\Gamma_i)} Z_0 = \left[\frac{1-\Gamma_r^2 - \Gamma_i^2}{(1-\Gamma_r)^2 + \Gamma_i^2} + i \frac{2\Gamma_i}{(1-\Gamma_r)^2 + \Gamma_i^2} \right] Z_0$$
$$= Z_r + iZ_i$$

(4.2-1)

ただし、

$\Gamma = \Gamma_r + i \Gamma_i$: 反射係数,

Γ_r : 反射係数実数部,

Γ_i : 反射係数虚数部,

Z_0 : 校正インピーダンス (=200Ω : ロード抵抗)。

インピーダンス絶対値 $|Z|$ は次式を用いて計算した。

$$|Z| = \sqrt{Z_r^2 + Z_i^2} \quad (4.2-2)$$

ただし、

Z_r : 校正処理後の反射係数から求めたインピーダンス実数部 (抵抗分),

Z_i : 校正処理後の反射係数から求めたインピーダンス虚数部 (リアクタンス分)。

インピーダンス (実数部, 虚数部, 絶対値) は周波数に対するグラフに表示し、巻末に示した。1024 トレースのうち、第1トレースと第512トレース、第1024トレース及び全トレースをスタックしたデータの4種類をそれぞれのアンテナ、測定位置についてグラフを作成した。測定データはそれぞれのアンテナ及び位置でほとんど同じ値が得られ、安定した測定ができたと考えられる。

4. 1 に記した校正作業の結果、自動測定で得られたデータは主にアンテナのインピーダンス特性を示している。

アンテナAは、低い周波数でインピーダンス値が大きく変化し、12MHz 以下でインピーダンスの虚数部が正の大きな値であることから誘導性を示し、12MHz 以上ではインピーダンスの虚数部が負の値を示すことから、容量性であることがわかる。アンテナBとCはインピーダンスの虚数部の値は小さく、絶対値と実数部の値にほとんど差がない。従って、アンテナにおける位相差はほとんど生じていないものと考えられる。アンテナB, Cのインピーダンスは周波数によらず 200Ω 弱を示す。アンテナB, Cは 200Ω のローディング抵抗を並列に接続しているためであり、200Ω との差分がアンテナ以外の応答であると考えられる。

4. 3 時間領域波形

以下に表 3. 1-1 に示した各実験で取得されたデータを整理した結果について述べる。時間領域波形は、ウィグル・バリアブル表示で描画した。

(1) 自動測定

図 4. 3-1 にアンテナ A，図 4. 3-2 にアンテナ B，図 4. 3-3 にアンテナ C の時間領域波形をそれぞれ示す。いずれも第 1 トレースがポジション A，第 2 トレースがポジション B である。いずれも 1024 回の測定波形の加算平均をとったものである。

倉庫の天井までの往復走時 τ (nsec)は、

$$\tau = \frac{2h}{c} \quad (4.3-1)。$$

ただし、

h : 倉庫天井の高さ(m)

c : 空気中の電磁波伝搬速度 (0.2998m/nsec)

である。(4.3-1)式を用いて倉庫天井までの往復走時を計算した値を表 4. 3-1 に示す。

表 4. 3-1 倉庫天井までの往復走時

位置	伝搬距離(m)	往復走時(nsec)
ポジション A	7.34	48.9660
ポジション B	5.26	35.0901

いずれのアンテナについても計算した走時の付近に明瞭な反射波は見られな
いが、位置による波形の相違は認められる。反射波の成分として周りのコンクリ
ート壁や、スチール製の棚などの反射波が含まれ、天井の反射波が明瞭に受信で
きなかつたものと推定される。

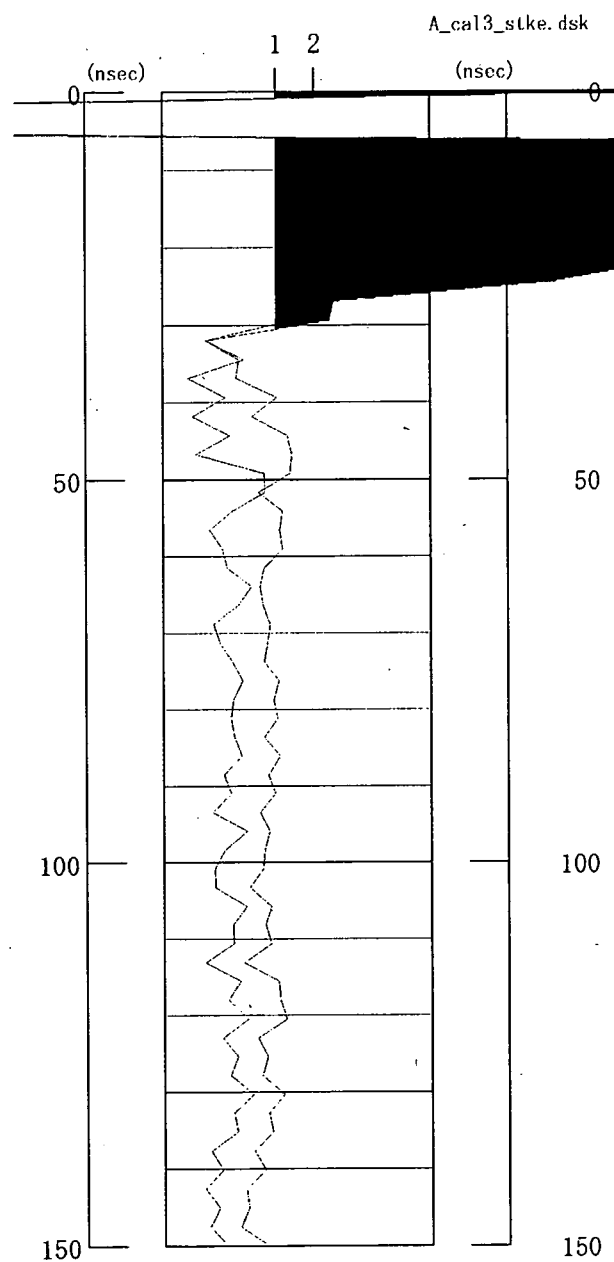


図 4.3-1 自動測定（アンテナ A）の時間領域波形

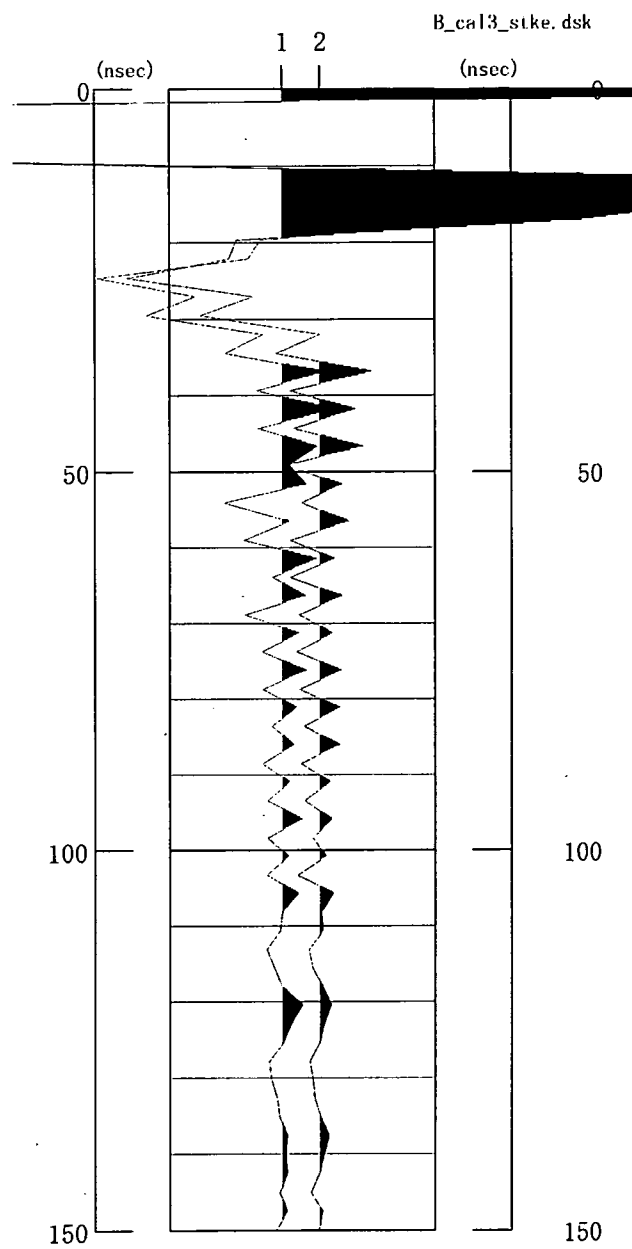


図 4.3-2 自動測定（アンテナB）の時間領域波形

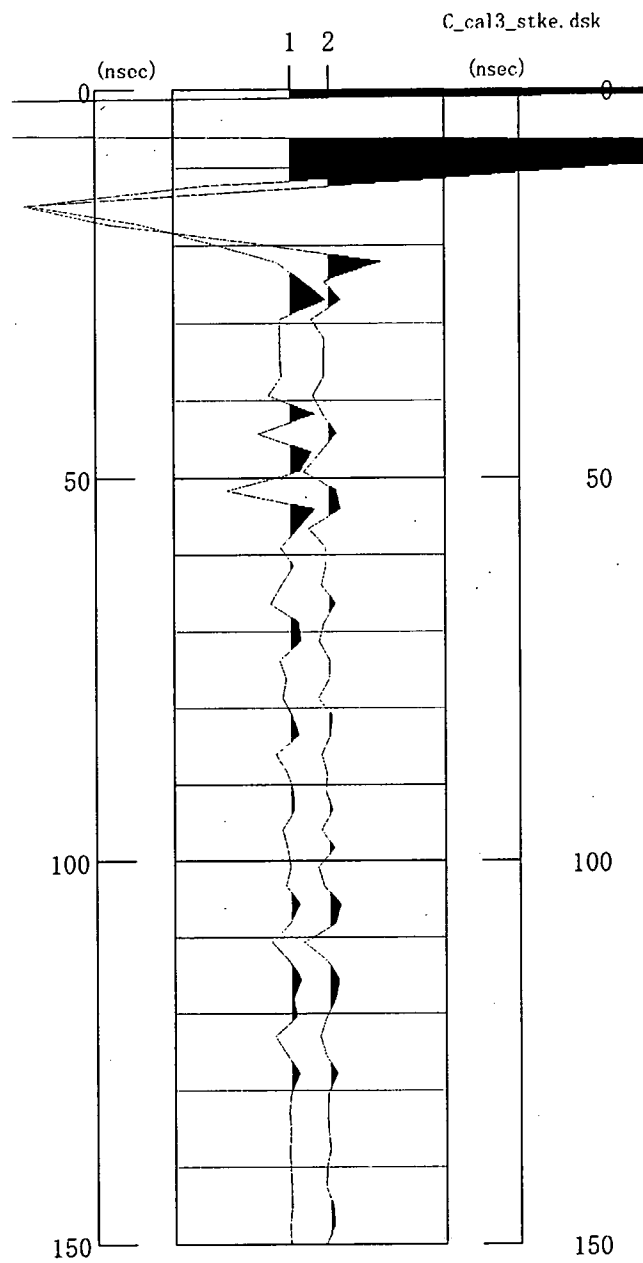


図 4.3-3 自動測定（アンテナC）の時間領域波形

(2) アベレージ回数確認測定

アンテナCを用いて、自動測定プログラムから実験機のアベレージを設定して得られた波形を図 4.3-4 に示す。同図は第 1 トレースから順にアベレージ回数を 1, 2, 4, 8, 16, 32 回に変更したときの波形を順に左から並べて示したものである。アベレージの回数によらず図 4.3-3 の第 1 トレース (ポジションA) と同じ波形が測定されている。自動測定プログラムのパラメータ設定により IF 帯域幅を設定し、測定できることが確認できた。

(3) IF 帯域幅確認測定

アンテナCを用いて、自動測定プログラムから実験機の IF 帯域幅を変更して測定した波形を図 4.3-5 に示す。同図は IF 帯域幅を 10, 30, 100, 300, 1000, 3000, 3700, 6000Hz で各 2 トレースずつ測定を行った (従って、全 16 トレース) 波形である。IF 帯域幅によらず図 4.3-3 の第 1 トレース (ポジションA) と同じ波形が測定されている。自動測定プログラムのパラメータ設定により IF 帯域幅を設定し、測定できることが確認できた。

(4) 倉庫扉反射測定

図 4.3-6 に倉庫扉の反射波を測定した時間領域波形を示す。第 1 トレースから順に倉庫扉まで 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11m である。(4.3-1) 式を用いて、倉庫扉までの往復走時を計算した値を表 4.3-2 に示す。図 4.3-6 中に示した矢印が、倉庫扉からの反射波と考えられる。矢印の位置をそれぞれ読み取ると、22, 29, 37, 43, 49, 56, 64, 69, 76nsec となり、3m と 11m の走時差は 54nsec である。読み取った数値を表 4.3-2 の計算値と比較すると約 2nsec の違いがあるが、サンプリング間隔分 (2.442nsec) 程度の誤差である。走時差の計算値は 53.4nsec となり読み取った走時差は、ほぼそれと一致する。

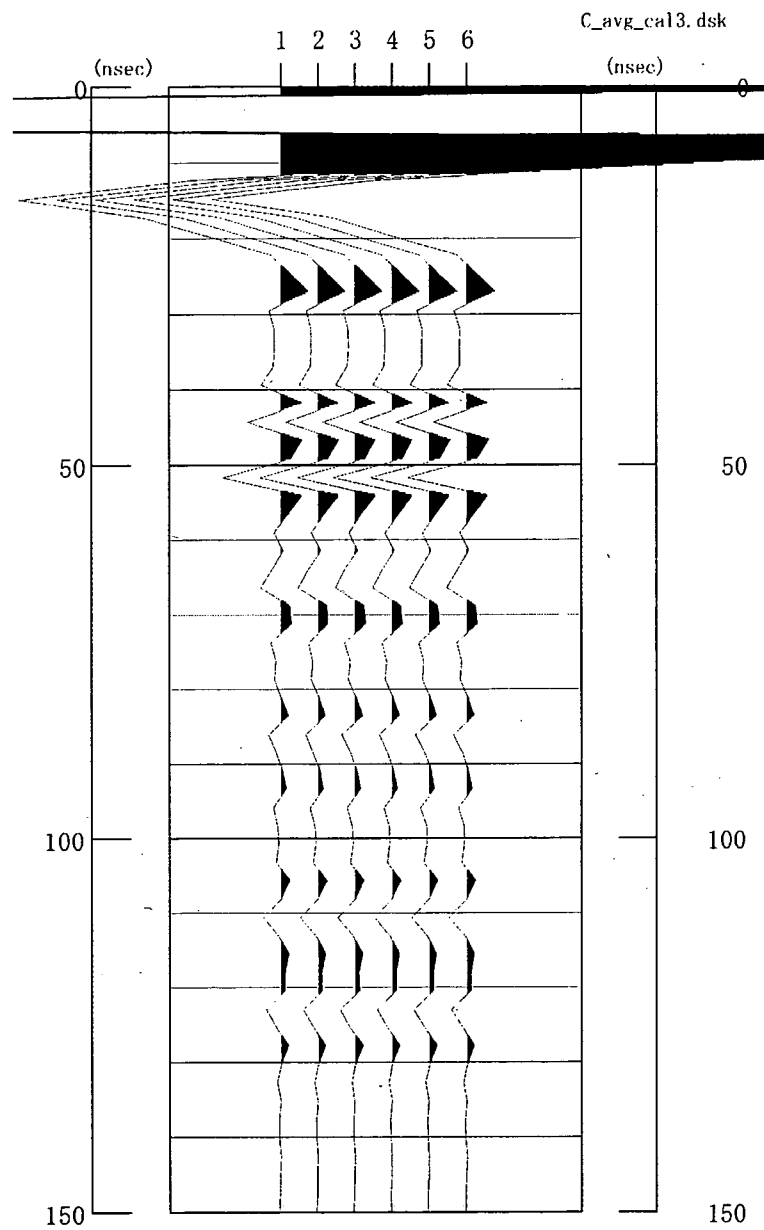


図 4.3-4 アベレージ回数確認測定時間領域波形（アンテナC，ポジションA）

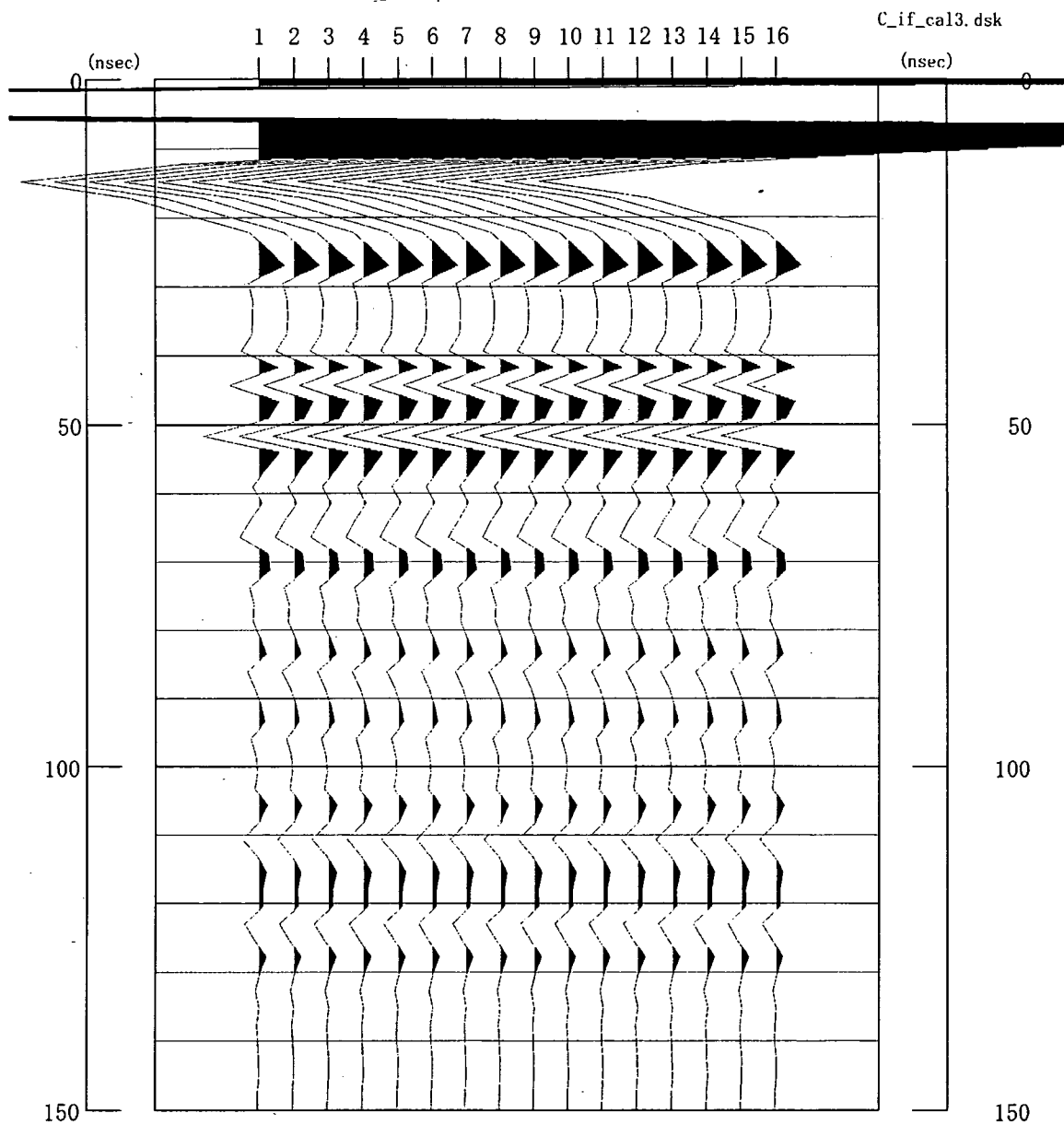


図 4.3-5 I F 帯域幅確認測定時間領域波形 (アンテナC, ポジションA)

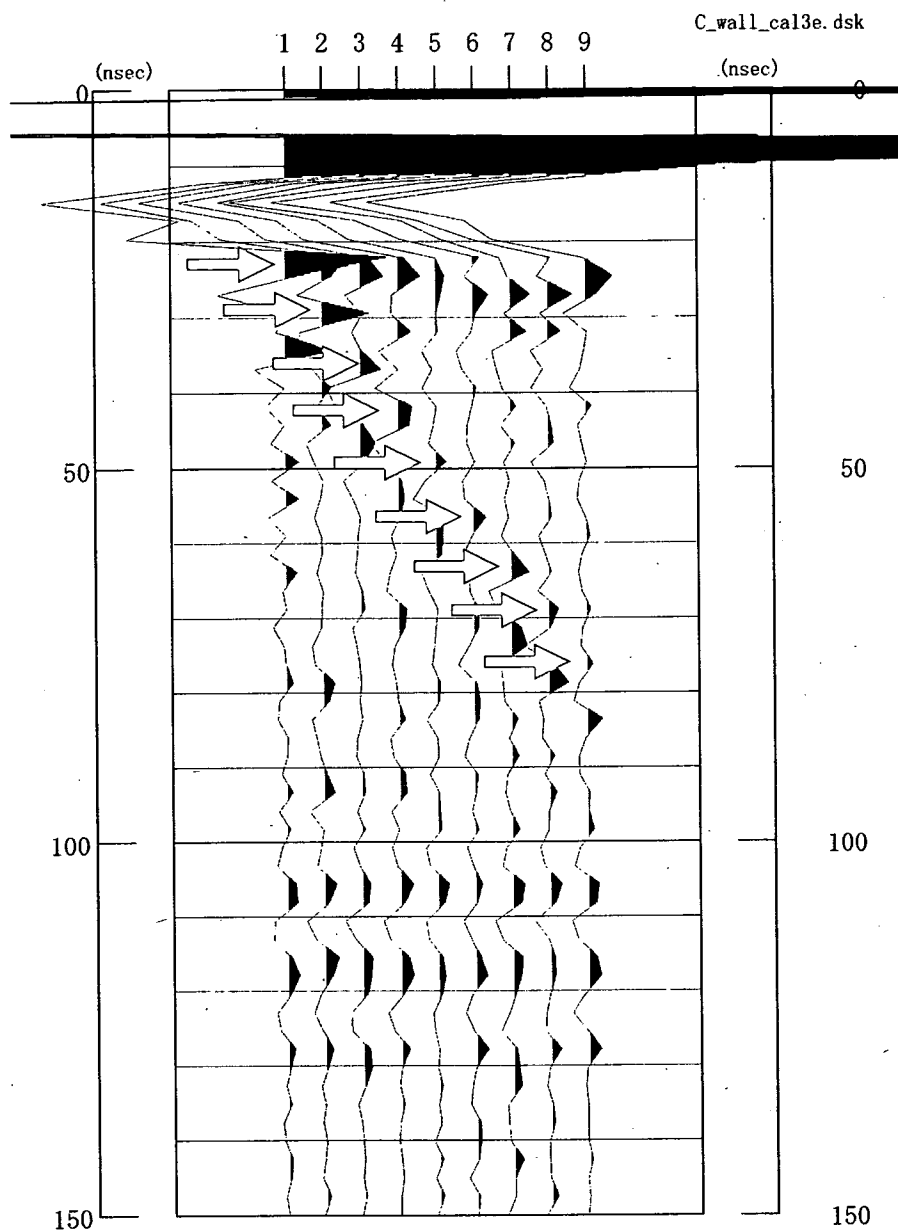


図 4.3-6 倉庫扉反射測定時間領域波形（アンテナC）

表 4.3-2 倉庫扉までの往復走時

伝搬距離(m)	往復走時(nsec)
3	20.0133
4	26.6845
5	33.3556
6	40.0267
7	46.6978
8	53.3689
9	60.0400
10	66.7111
11	73.3823

5. 実験機改良に関する概念設計

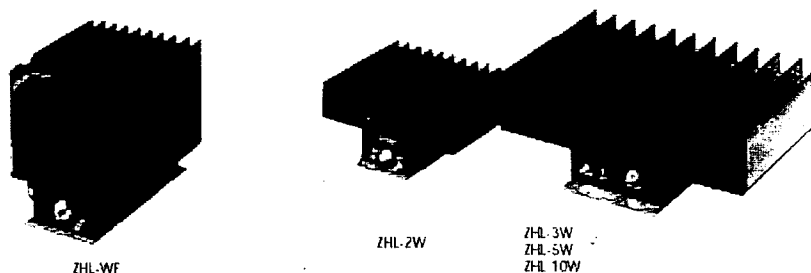
連続波レーダー実験機を用いてこれまで実施した測定作業全般に基づき、本実験機を実用装置として使用するために必要な改良点を抽出し、その概念設計を行った。

5. 1 送信電力の高出力化

実験機（HP8753E）の最大出力は 10dBm（10mW）である。探査深度，到達距離を伸ばす 1 つの方法として，送信出力レベルを増幅する方法がある。送信出力を最大 10W（40dBm）程度にすることを考えた場合，市販の高周波増幅器（いわゆるアンプ）として表 5. 1-1 に示すものがモジュール部品として入手可能である。この増幅器はアンテナへ電力を供給する必要があるため電力増幅器である。これらの概観及び主な仕様を図 5. 1-1～2 及び表 5. 1-2 に示す。

表 5. 1-1 高周波増幅器の例

製品番号	製造元	周波数範囲	最大出力	アンプゲイン	電源(DC)
ZHL-1A	minicircuit	2-500MHz	28dBm	16dB±1dB	24V/0.6A
ZHL-5W-1	minicircuit	1-500MHz	37dBm	38dB±1dB	24V/3.3A
T142-302AA	Thamway	0.1-400MHz	30dBm	30dB±0.5dB	28V/0.8A
T142-4029A	Thamway	0.1-350MHz	40dBm	40dB±1dB	28V/2.2A



up to 5W (+37 dBm) output

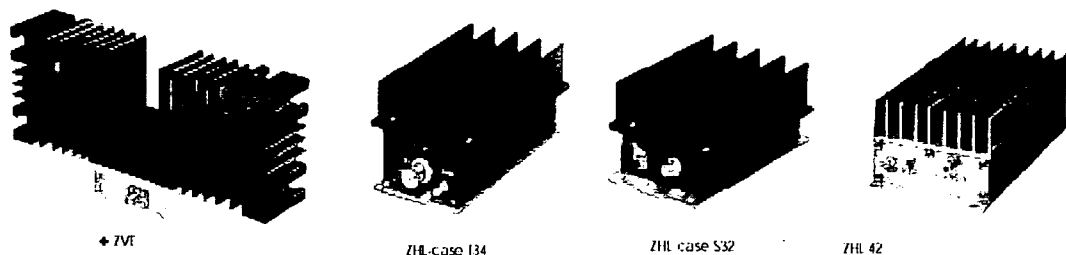
MODEL NO.	FREQ. (MHz) f_1 - f_2	GAIN (dB)		MAXIMUM POWER (dBm)		DYNAMIC RANGE		VSWR		DC POWER		CASE STYLE	CONNECTION	PRICE \$
		Min.	Flatness Max.	Output (1 dB Comp.)	Input (no damage)	NF (dB) typ.	IP3 (dBm) typ.	In	Out	Volt (V)	Current (A)			
ZHL-03-5W	60-300	30	±1.0	-36	+10	4	+47	1.4:1	1.5:1	24	2.8	CP641	—	495.00
ZHL-1-2W	5-500	29	±1.0	-33	+10	12	+44	2:1	2:1	24	0.9	135	—	525.00
ZHL-7-2W	600-800	28	±1.0	-33	+10	17	+43	2:1	2:1	24	0.9	135	—	~~495.00~~
ZHL-1000-3W	500-1000	38	±1.0*	+35**	0	9	+45	2:1	2.5:1	24	2.25	DDD338	—	695.00
ZHL-5W-1	1-500	40	±1.5	-37	0	9	+49	2:1	2.5:1	24	3.3	DDD131	—	995.00
ZHL-900-10W	480-900	19	±1.0	-38	-25	10	+50	2:1	2:1	24	5.5	DDD338	—	1995.00

* WHILE SUPPLIES LAST

* 1.5 dB over temperature range -20 to +65 deg. C

** +37 dBm typical

図 5. 1-1 高周波増幅器の概観（その 1）(<http://www.minicircuit.com>)



up to 1W (+30 dBm) output

MODEL NO.	FREQ. (MHz)	GAIN (dB)		MAXIMUM POWER (dBm)		DYNAMIC RANGE		VSWR Max.		DC POWER		CASE STYLE	PRICE \$
		Min.	Flatness Max.	Output (1 dB Comp.) Min.	Input (no damage)	NF (dB) typ.	IP3 (dBm) typ.	In	Out	Volt (V)	Current (A)	Note B	
◆ ZVL-8G	7000-8000	30	±2.0	-30*	+20	4	40	2:1	2:1	12	2.0	BN333	1095.00
ZHL-1A	2-500	16	±1.0	-28	+20	11	-38	2:1	2:1	24	0.60	S32	229.00
ZHL-2	10-1000	16	±1.0	-29	+15	9	-38	2:1	2:1	24	0.60	I34	349.00
ZHL-2-8	10-1000	27	±1.0	-29	-5	10	-38	2:1	2:1	24	0.60	I34	525.00
ZHL-211	800-950	20	±0.4	-29	+15	8	-38	1.8:1	1.8:1	24	0.60	I34	295.00
▲ ZHL-2 12	10-1200	24	±1.0	-29*	+10	4*	-38	2:1	2:1	24	0.75	I34	675.00
ZHL-3A	0.4-150	24	±1.0	-29.5	+10	11	-38	2:1	2:1	24	0.60	S32	229.00
ZHL-37A	0.05-130	25	±1.0	-29	+10	10	-38	2:1	2:1	24	0.60	S32	229.00
ZHL-42	700-4200	30	±1.0*	-28	-5	10	-38	2.5:1	2.5:1	15	0.88	U36	895.00
ZHL-4240	700-4200	40	±1.5*	-28	-5	8	-38	2.5:1	2.5:1	15	0.90	U36	1395.00
ZHL-42W	10-4200	30	±1.5*	-28**	0	8***	-38	2.5:1	2.5:1	15	0.88	U36	1095.00
ZHL-4240W	10-4200	40	±1.5*	-28**	5	8***	-38	2.5:1	2.5:1	15	0.90	U36	1495.00

* -28.5 dBm maximum at 1000-1200 MHz
 ** -27 dBm at 10-700 MHz
 *** Below 100 MHz NF increases to 15 dB at 10 MHz
 * Below 100 MHz NF increases to 16 dB at 10 MHz
 ★ Measured at 25°C.
 ☆ At +25°C, +30 dBm typ. at 54°C amb.

図 5. 1-2 高周波増幅器の概観（その 2）(<http://www.minicircuit.com>)

表 5. 1-2 高周波増幅器の仕様(<http://www.thamway.co.jp/>)

仕様		製品					
型式番号		T142-3315A	T142-302AA	T142-4029A	T142-432AA	T142-4749A	T142-5059A
周波数帯域		10k-50MHz	100k-400MHz	100k-350MHz	300k-500MHz	1M-250MHz	5M-200MHz
出力電力		2W	1W	10W	20W	50W	100W
利 得		33dB	30dB	40dB	43dB	47dB	50dB
利得偏差		dB	±0.5dB	±1dB	±1.5dB	±1.5dB	±1.5dB
高調波歪		-25dB typ	-20dB typ	-20dB typ	-20dB typ	-20dB typ	-20dB typ
入出力インピーダンス		50Ω	50Ω	50Ω	50Ω	50Ω	50Ω
入力レベル		0dBm	0dBm	0dBm	0dBm	0dBm	0dBm
最大入力レベル		+5dBm	+5dBm	+5dBm	+5dBm	+5dBm	+5dBm
入出力コネクタ		BNC	BNC	BNC	BNC	BNC	BNC
電源	(Aタイプ)	AC100V	AC100V	AC100V	AC100V	AC100V	AC100V
	(Bタイプ)	DC28V-0.8A	DC28V-0.8A	DC28V-2.2A	-	DC28V-10A	-
外形寸法	幅	213	213	213	213	213	480
	高 さ	88	88	88	130	130	149
	奥行き	300	300	300	300	300	450

送信出力を高出力化することによって送信器単体以外に見直しを必要とする事項は以下の通りである。

- ① 同軸ケーブルによる電力損失
- ② バランのコア材の飽和点、巻線の許容電流
- ③ アンテナ終端抵抗の許容電力
- ④ 電力増幅器の発熱量
- ⑤ 発熱低減、トータル消費電力低減のため送信の ON/OFF のコントロール
- ⑥ 陸上におけるアンテナについては、空中への電波の漏れるレベル

出力レベルは理論的にはいくらでもあげることができるが、現実問題として、電源の容量、装置の大きさ、トータルの S/N 比などを考慮すると、30~40 dBm (1~10W) 程度の範囲となる。10W 以上の出力も可能であるが、例えば 50W クラス (46dBm) の電力増幅器では、電源容量が 28V10A 以上必要である。このとき増幅器の発熱は概略で 230W に達し、増幅器の強制空冷を必要とする。上述の見直し事項を考慮すると 10W 以上の送信電力を有する装置を野外で使用することは現実的でないと考えられる。特に陸上で使用するアンテナには内面に電磁波吸収体であるフェライトを張って電磁波の空中への漏洩を防止している。しかし、送信出力をあげることで、漏洩する電磁波レベルも上昇するため周辺の電磁波環境への対策によっては、アンテナがさらに大きく、重くなる可能性がある。

地中の電磁波の減衰率は例えば 3dB/m を仮定すると、送信電力を 2 倍 (=3dB) にしたとしても、元の送信電力に比べて探査距離は 1 m 延長するのみである。

従って、上記の検討を踏まえると、送信電力は現実的に 10W 程度にとどめ、受信アンテナ側で利得をかせぐことを検討したほうが得策である。

受信用増幅器については、送受信アンテナ間の距離やアンテナ設置面のインピーダンスを考慮して、できるだけダイナミックレンジを確保できるように、利得を可変できるような増幅器にすべきである。この増幅器はアンテナに励起された電圧を増幅する電圧増幅器である。電圧増幅器は前置増幅器（プリアンプ）ともいう。

5. 2 指向性アンテナ

アンテナに指向性を持たせることにより、探査する方向を制御し、一方向のみのデータが取得できるため、地中のモニタリングや 3 次元の調査などに有効である。しかし、現実的に地中レーダーのような広帯域の電磁波を送受信するアンテナで指向性を制御することは難しい。

音声の通信（例えばラジオやテレビ放送など）では、取り扱う周波数帯域が 10 kHz 程度であり、空气中を伝搬する電磁波速度が一定であるため、設計どおり

の指向性を持たせることが可能である。しかし、地中レーダーの場合、周波数帯域を数百 MHz にする必要があり、これをただひとつのアンテナ（ダイポール・アンテナ）で送受信した場合、図 5.2-1 に示すように周波数あるいは波長（同じ周波数でも媒質の電磁波速度により波長が異なる）により、指向性パターンが変化する。さらに、媒質の特性によっても指向性パターンは異なる。従って、広帯域にわたって異なる周波数の電磁波に同じ指向性を持たせることは難しい。

ダイポール・アンテナを応用して指向性を持たせることができるのはテレビ受像機に用いられている八木宇田アンテナやビームアンテナである（八木宇田アンテナをビームアンテナの一種とする分類もある）。しかし、これらのアンテナもダイポール・アンテナを利用しているため、上述の問題が残る。また、アンテナが大型化するなどの問題が生じる。

ダイポール・アンテナ以外のアンテナで指向性の鋭いアンテナとして、ホーン・アンテナなどが考えられるが、ホーン・アンテナは GHz 以上の周波数帯では比較的小型にできるが、数 MHz～100MHz 程度の周波数帯では大型になることは避けられない。

他にも、アンテナをアレイにし、各アンテナ間の位相を制御することにより、平面波を合成し、指向性をコントロールすることは原理的に可能であるが、アンテナの大型化、周波数による指向性パターンの変化などの問題が残る。

航空機管制用のレーダーとして使用される電磁波の到来方向を検知するアンテナ（方向探知機、略して「方探」と呼ばれる）は、ループ・アンテナを回転させることによって電界強度の最大方向を検知するアンテナである。この方探の原理を応用して、アンテナに指向性を持たせることができる。ただし、この場合にはアンテナの向きを測定する方位計が必要となる。

アンテナを移動させず、長期のモニタリングなどを行う場合には、アンテナの大きさを考えなくても設計が可能である。

アンテナと設置面とのインピーダンス整合を図るため、アンテナと設置面の間に誘電体を挟む方法も S/N 比を向上させるために有効である。

アンテナの指向性とは別であるが、電磁波の偏波を測定することにより、反射体の散乱を捉える試みが行われている。例えば、ダイポール・アンテナの送受信をそれぞれ直交に組み合わせる（あるいはダイポール・アンテナとスロット・アンテナの組み合わせる）ことにより、直線的に伸びる反射体（破砕体や埋設管など）の延長方向や、散乱行列から破砕体の破砕状況を探査した事例がある（例えば、Zhou and Sato, 2000）。

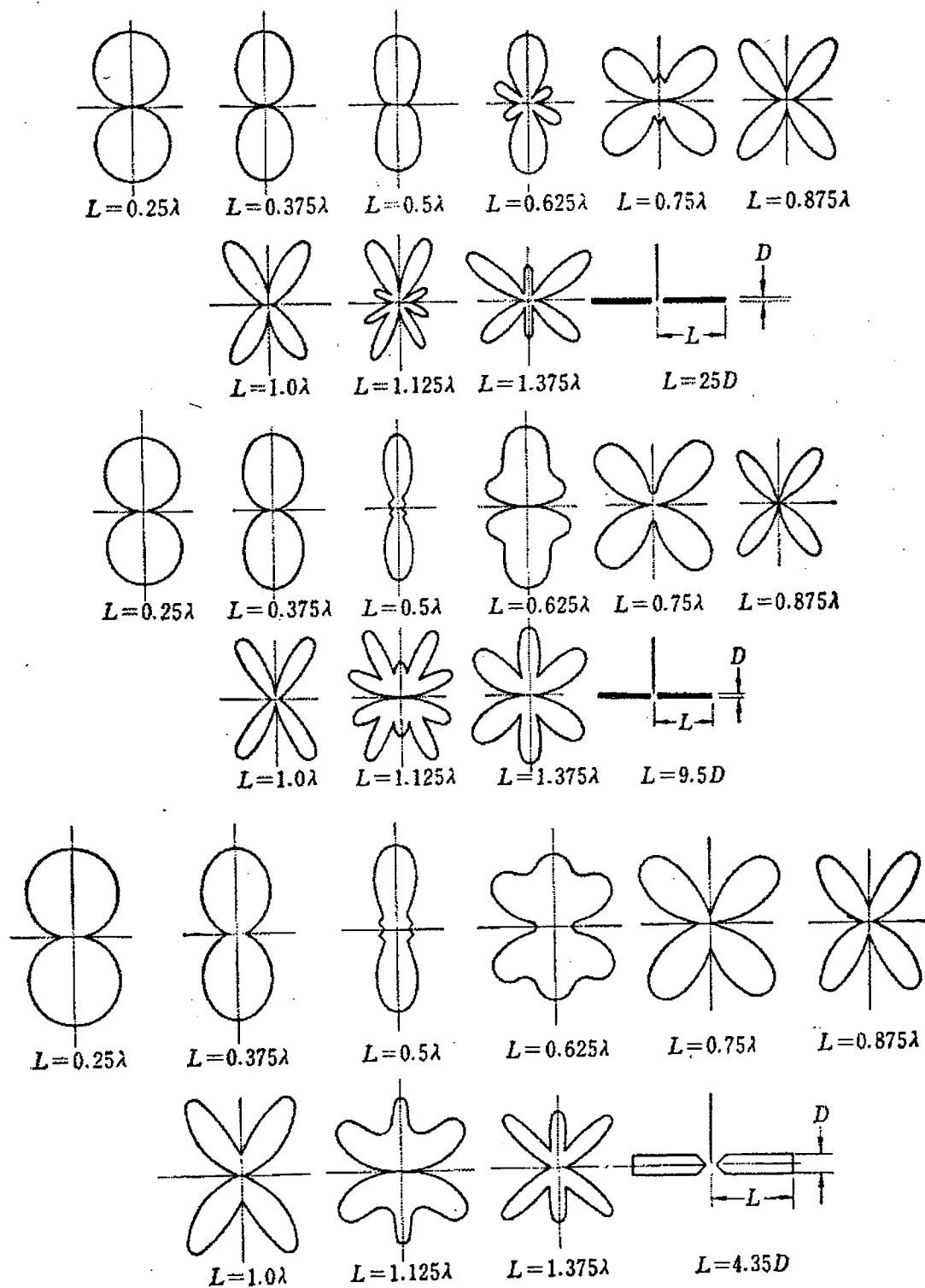


図 5.2-1 ダイポール・アンテナの指向性パターン (松本, 1969)

5. 3 ボアホール型アンテナ

ボアホール型アンテナを設計するにあたっては、まずアンテナを挿入するボーリング孔の内径を考慮する必要がある。次に、ボーリング孔の深度により耐水圧を設計する必要がある。耐水圧を設計するとアンテナの大きさが決まり、送信器及び受信器の大きさが決まる。ボアホール型アンテナは第一に外形寸法を決め、その制約条件の下で設計する必要がある。そのため、アンテナの利得が制限される可能性がある。

図 5.3-1 に現在使われているボアホール型アンテナの形状を示す。ボウタイ・アンテナは通常の地中レーダー装置（パルス波）でも用いられているものであり、帯域が広いのが特徴である。しかし、ボアホール型にするとアンテナの幅が狭くなり、面積が減少し、アンテナの利得が低下する。アンテナの面積を増加させるために考案されたのが、五角形ダイポール・アンテナである。利得は向上するが、帯域がボウタイ・アンテナに比べて狭く、周波数特性にピークやディップが生じやすい。円筒形ダイポール・アンテナは、トモグラフィ測定などクロスホールの測定を行う場合に採用される。振幅の評価を行うためには、円周方向に同じエネルギーの電磁波が放射される必要があるためである。

どのアンテナを採用するかは、使用する目的（透過距離など）を考慮して設計する必要がある。

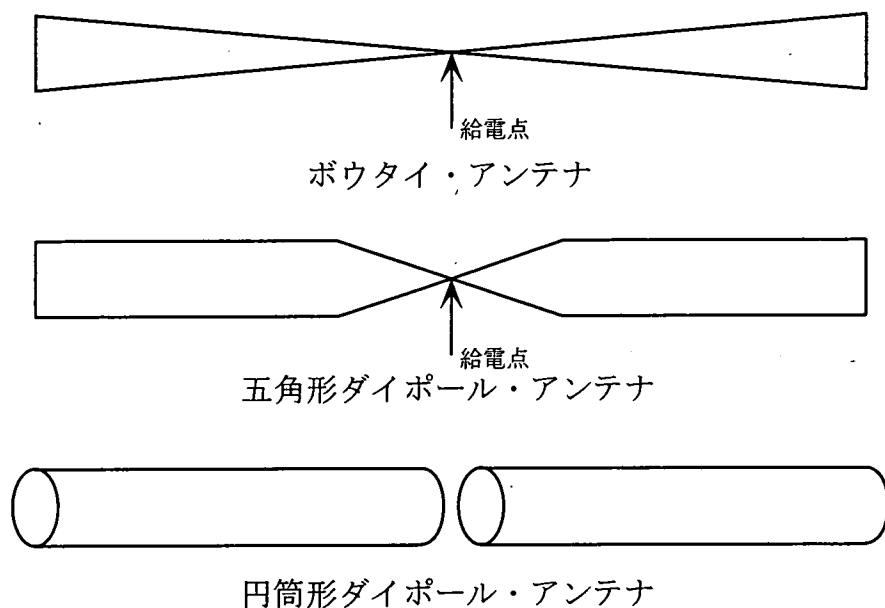


図 5.3-1 ボアホール型アンテナの例

S/N比を向上させるために、増幅器（送信，受信とも）はできるだけアンテナに近いところに設置する必要がある。ボアホール型アンテナは大きさの制約があることから既製品の増幅器を適用することができない。そのため、特別に設計した増幅器を検討する必要がある。

後述するように、ノイズ対策として光ファイバケーブルを使用した場合、バッテリーをアンテナ内に設置する必要がある。このとき、送信器や受信器の消費電力とバッテリーの容量を十分検討する必要がある。

ボアホールの測定を大深度で行う場合、孔内でのアンテナの移動に時間がかかるため、地上から電源の入切を制御することや、バッテリーの残容量のモニターができる装置を搭載することなどを検討する必要がある。特に送信器をバッテリー駆動した場合、バッテリーの残容量により送信電力が変化する可能性があるため、振幅（減衰）トモグラフィの精密な解析にはバッテリー残容量モニター装置が必要である。

5. 4 ノイズ対策

連続波レーダー探査装置におけるノイズの発生原因は、以下の2点に大きく区分することができる。ひとつは電子回路のノイズであり、増幅器，電源部などから発生するものである。もうひとつは送信アンテナの送信信号が地中を透過せずに接続ケーブルから受信する成分である。装置からアンテナへの接続ケーブルは、ケーブルを延長した際にケーブル自信がアンテナとなって不要な信号を送受信する可能性がある。

電子回路のノイズ低減については、単体ではネットワークアナライザを使用する際にはその性能に依存するが、アンテナを含めた総合特性は、送信電力の増大，または受信増幅器（プリアンプ）を設置することによる受信信号レベルの高感度化によって総合的なS/N比を向上させることができる。

接続ケーブルによるノイズについては、アンテナと装置間を光ファイバにし、メタルケーブルを使用しないようにすることにより、対策を講じることができる。しかし、そのためにEO（電気→光），OE（光→電気）の変換回路が必要になる。EO，OE変換器による変換では，S/N比が40～50dBに劣化する可能性がある。このため受信アンテナにプリアンプをいれることが必要となる。このとき増幅器回路に電源を外部から供給することはできないため，（電源線がアンテナとして動作する可能性がある）バッテリー駆動をする必要がある。

EO，OE変換によってアナログ信号を転送する場合，信号レベルを光の強さに変換する方法と周波数変調をかけてキャリアにのせて転送する方法がある。連続波レーダー装置では転送する周波数が広帯域であり，位相特性が問題となるため，信号強度を光の強さに変換する方法を採用することになる。

EO 変換機の主要部品であるレーザダイオードの特性例を図 5.4-1 に示す。

図 5.4-1 の P-1 (左上の図) からファイバへの光出力はモジュールの駆動連流と線形関係にあり、周波数特性は 800MHz まで確保されているので、200MHz 程度の周波数信号に対しては、適当なバイアス電流を流しておけば、十分に使用が可能である。

一方受光素子の感度は pin フォトダイオードと呼ばれるもので、0.7A/W 程度、周波数帯域は 1~3GHz であるが、電流雑音が 10pA/√Hz 程度発生する。例えば、周波数帯域を 1 GHz とすると、約 0.3 μA の電流雑音を発生する。

いまレーザダイオードで光信号レベルを 10mW 出力したとすると、受光素子は 7mA の出力に対して 0.3 μA のノイズが付加されるため、S/N比は光信号の電力換算で 42dB となる。ただし、これは現在あるデバイスを理想的な条件のもとで組み合わせた理論値で、実際には出力側のバイアス電流に含まれるノイズ、受光アンプのノイズなどが付加されるので S/N比はさらに低下する可能性がある。

特性曲線

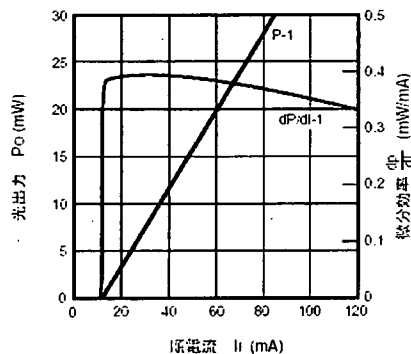


図1 光出力-駆動電流特性

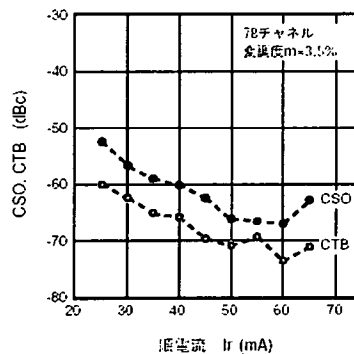


図2 複合相互変調

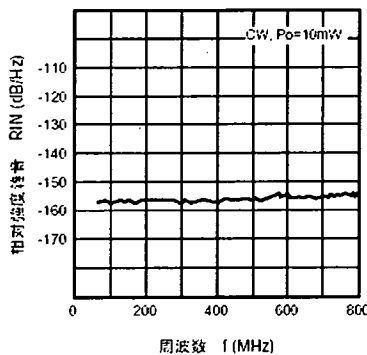


図3 相対強度雑音-周波数特性

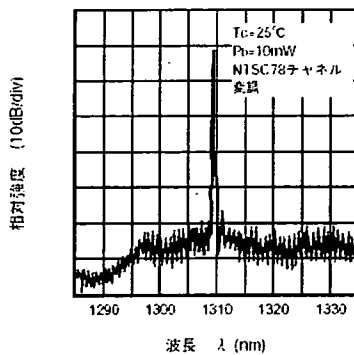


図4 発振スペクトル特性

図 5.4-1 1.3 μm 帯シングルモード光ファイバ用 LD モジュール特性例

5. 5 その他必要な機能

一般的に電磁波による探査では、1点のみで観測を行うことは少なく、対象エリアを一定の間隔で探査をし、断面図（プロファイル）出力をする。そのため、装置を移動する必要がある、装置（特にアンテナ）の操作性が現場測定での作業効率を左右する。そのため以下のような項目に注意して設計をする必要がある。

①データ処理時間

データの収録方法を検討し、データの収録・処理を最適化する必要がある。

②アンテナの大きさ・重量

地表要アンテナは、その大きさ・重量によって測定作業効率に影響する。アンテナの大きさによっては、アンテナを搭載することができる台車やソリが必要である。また、アンテナの重量によってはアンテナを牽引するための牽引車なども検討する必要がある。

ボアホール・アンテナについては、ボーリング孔の大きさに依存することは前述の通りである。重量については、ケーブル・ウインチやブレーキ・システムのトルクに影響を及ぼすため、十分な検討が必要である。

③電源（特に商用電源のない野外での使用）

バッテリーを使用する場合には、装置の消費電力や作業時間を考慮し、バッテリーを選定する必要がある。ネットワークアナライザについては DC-AC インバータを用いてバッテリーから AC 電源を確保する電源システムを検討する必要がある。

④測定位置

測定位置に関する情報を測定データと同期させて記録する必要がある。例えば各トレース記録のデータファイルのヘッダー部に記録するなどの方法が考えられる。

位置情報を記録する装置としては以下のものが考えられる。

- ・ 回転体とエンコーダを組みあわせて基準地点からの距離を出力する距離計
- ・ GPS を使用し、緯度、経度で観測点の位置を求めるポジショニングシステム
- ・ ボアホール・アンテナについては、線長計によるゾンデ深度の表示

などである。

⑤データ処理

本業務では、周波数領域の反射係数データを逆 FFT 処理することにより、時間領域波形を生成するプログラム（自動測定プログラム）を作成した。これらのデータは、測定開始・終了周波数前後でデータがないため、スペクトルの形状は矩形である。これを逆 FFT 処理により、時間領域波形に変換するとリングング（「サイドローブ」という呼び方もある）が発生するため、通常は周波数領域でなめらかな形状のウィンドウ（例えば、ブラックマン・ウィンドウ、ハニング・ウィンドウなど）を持ったフィルターを通し、リングングが発生しないような処置をとっている。

時間領域の波形は取得データの周波数帯域幅に依存するため、分解能が劣化することがある。地中の減衰率は高周波数ほど大きい（分散）ため、透過波や反射波の帯域は制限される。そのため、分解能を向上させる措置としてデコンボリューションがある。ただし、分散によりウェーブレットが最小位相でないときは、通常反射法地震探査で使用されているデコンボリューションでは効果が無いことがわかっている。このため、電氣的な Q 値を考慮したデコンボリューションが提案されている (Turner, 1994)。

取得データを表示・印刷するために、波形プロファイルの描画プログラムがあると便利である。任意のトレース、任意の時間帯を選択できるだけでなく、波形の表示方法もウィグル、ウィグル・バリエブル、カラー、グレースケールなどで表示することができる地中レーダー用のプログラムが、最近では比較的安価に入手できるようになっている。

実験機を実用化するためにはハードウェアだけでなくソフトウェアについての検討も不可欠である。

⑥その他

実験機を実用化するためには、アンテナ、増幅器、光ケーブル、OE・EO 変換器、バッテリーなどであるがこれらを現地で使うためには、一体型の筐体に組み込む必要がある。これは、現場でアンテナ移動時に生じる振動や、粉塵・雨などから装置を保護するとともに、強度を保つために必要である。

これらの各機器を組み込む際には、それぞれの機器の配置やケーブルの引き回しなどを十分検討し、各機器の性能が最良の状態で発揮できるよう配慮すべきである。

5. 6 連続波レーダー装置の構成

ネットワークアナライザを利用したレーダー計測では S_{11} の反射測定と S_{21} の透過測定が考えられる。ただし、 S_{11} 測定の場合は高出力化のため増幅器を接続した場合、増幅器が一方通行であるため反射波の測定ができない。従って、ここでは S_{21} による測定のための設計を考えることとする。

S_{21} による測定では送受信アンテナを1台にする（以下、1アンテナ方式と呼ぶ）方法がある。この方法には、

- ・ アンテナを1台にすることができる、
- ・ ゼロオフセットの測定ができる、

などのメリットがある。しかし、送信信号が受信信号に過大に侵入し、受信信号を歪ませるだけでなく、ネットワークアナライザに過大電流を入力し、破損する可能性があるなどのデメリットも考えられる。一方、送受信を2台のアンテナ（以下、2アンテナ方式と呼ぶ）とした場合、ロング・オフセットのワイドアングル測定から地下の電磁波速度分布を求めることができるというメリットがある。

図5.6-1に1アンテナ方式と2アンテナ方式の概念図を示す。原理的には1アンテナ方式は方向性結合器を用いることにより実現できると考えられるが、送受信のクロストークが既存装置では30dB程度と考えられ、方向性結合器によってダイナミックレンジが決まってしまう。これを避けるために、

- ・ 過大な入力があった場合に入力を制限するリミット・アンプ、
- ・ 送信中は増幅しない切り替えきつき増幅器、

を採用することが考えられるが、両者とも受信信号を歪ませる可能性があることは否定できない。2アンテナ方式では、特に装置を必要としないでクロストークを低減することができる。従って、ここでは2アンテナ方式を採用することとする。

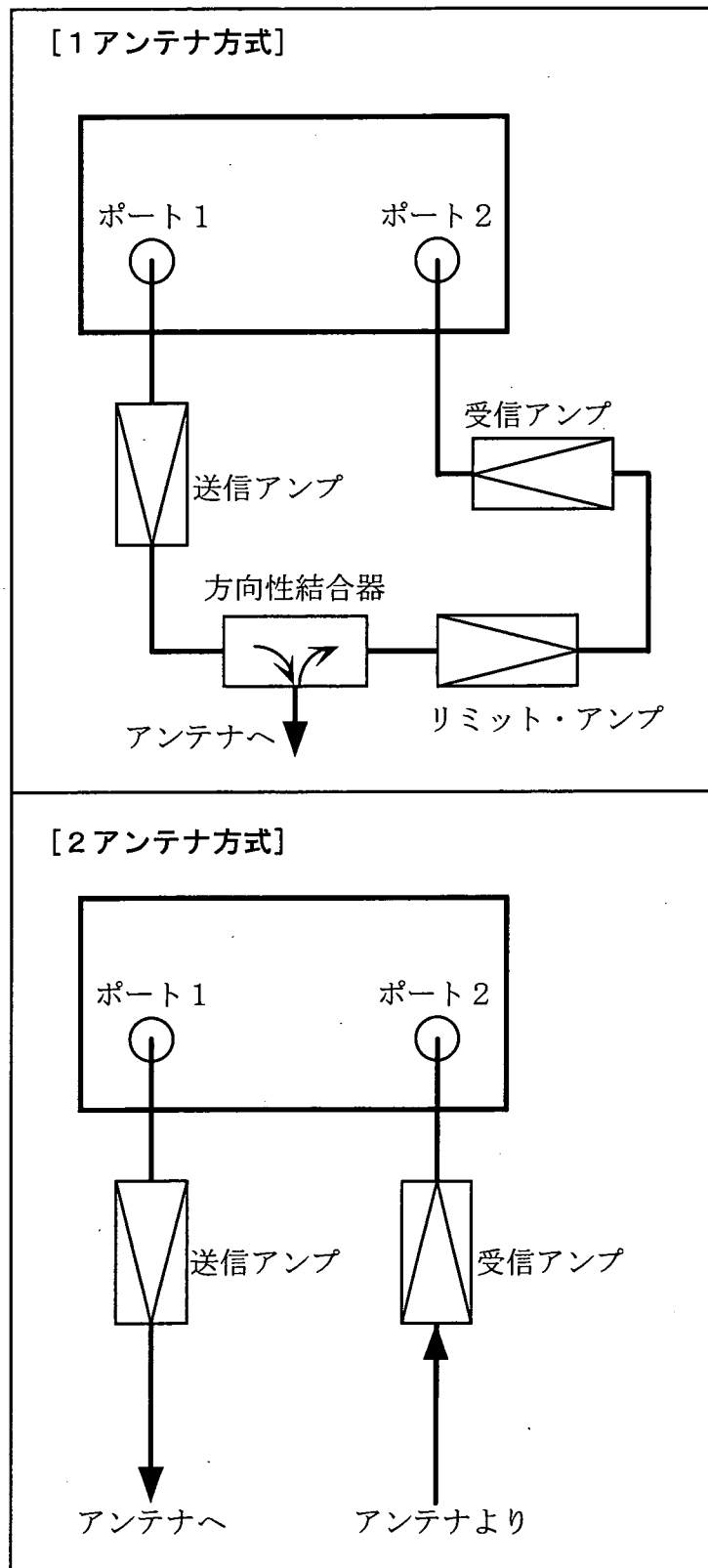


図 5.6-1 アンテナ方式により異なる機器構成

5. 5までの検討事項、既存のレーダー装置及び今までの実験結果を踏まえて図 5. 6-2 に示す機器構成を提案する。

本業務で調達した計測用パソコン（P C）と実験機（ネットワークアナライザ）はG P - I Bケーブルで接続される。

測定位置を検出するため、地表用レーダーではG P S受信機を用いて位置を測定する。ボアホール・アンテナの場合は、線長計（深度カウンター）を用いる。測定した位置または深度はデータと同期してデータのヘッダー部に書き込まれる。

ネットワークアナライザのポート 1 からの出力信号は E O 変換器を介して光信号に変換される。光ファイバ・ケーブルを通った光信号は O E 変換器で電気信号に変換され、増幅された後アンテナから放射される。O E 変換器を使用するため、アンテナ側はバッテリー駆動とする。

バッテリーを節約するため、計測中以外は送信側の増幅器の電源を切断するようにパソコンから制御を行う。この信号についてもノイズ対策として光信号を用いる。

アンテナから放射された電磁波は地中を透過・反射・屈折などにより受信アンテナにより検出される。受信側の増幅器で増幅された信号は、E O 変換器で光信号に変換され、ネットワークアナライザ側に送られる。ネットワークアナライザの直前で O E 変換器により電気信号に変換し、データを収録する。

なお、校正データはバランの先端で測定直線に行うが、校正作業は測定後に行う。そのため、校正作業用のプログラムが必要である。

詳細な設計については前節までに述べた検討事項を踏まえて実施する必要がある。

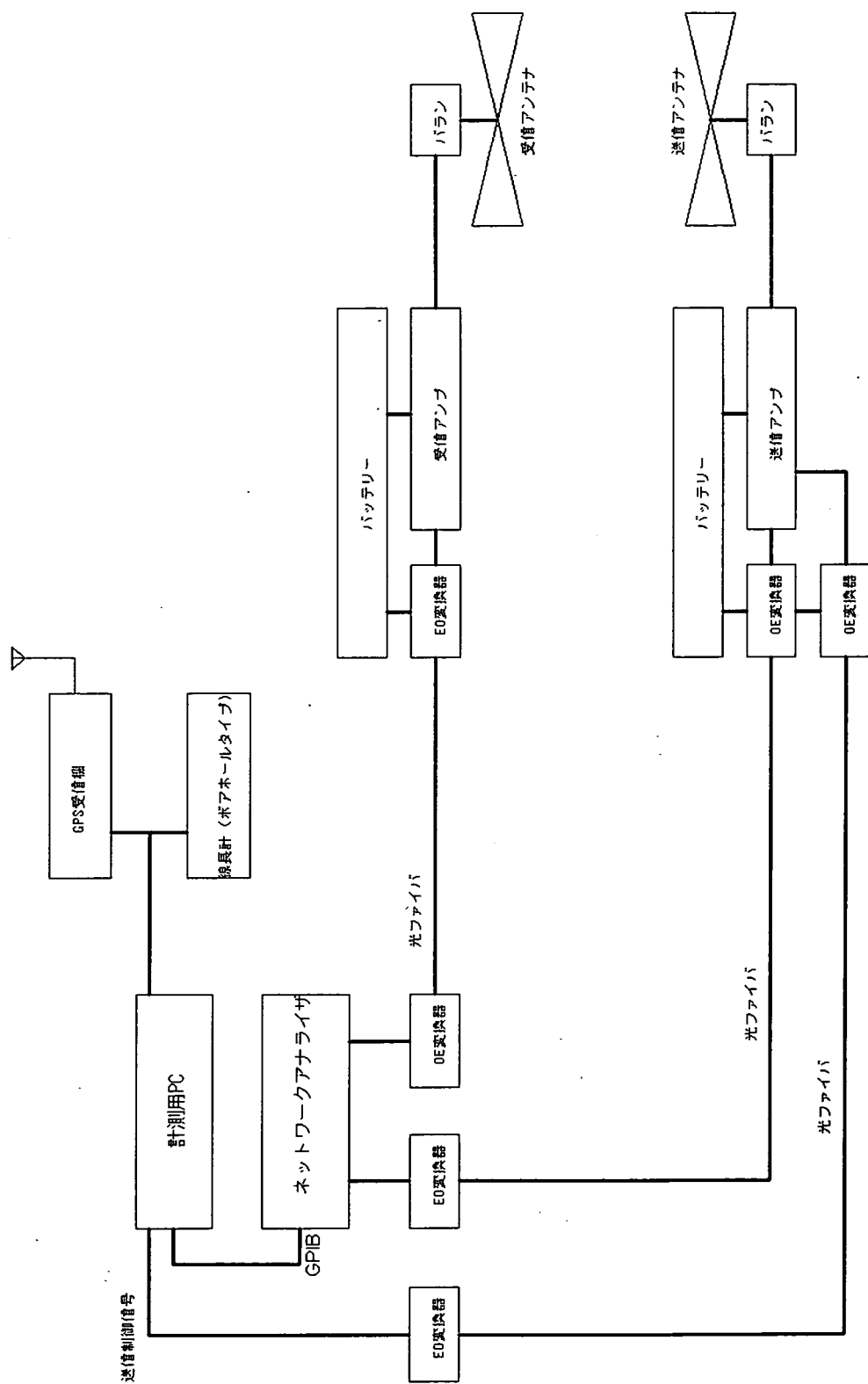


図5.6-2 連続波レーザー装置の機器構成案

6. まとめ

本業務は、ネットワークアナライザとアンテナによる連続波レーダー実験機の機能を拡張するため、時間領域波形を生成するための逆フーリエ変換プログラムを含む自動測定プログラムを作成した。これらの機能拡張により、長時間の連続測定及びリアルタイムでの時間領域波形の確認が可能となった。

拡張機能を利用して、反射係数の自動測定を行い、機能の安定性及び多量データの取得を実証した。

反射係数データに逆フーリエ変換を施し、時間領域波形において測定対象物からの反射波を確認した。

これらの拡張機能及び取得データに基づき、連続波レーダー実験機を実用化するための概念設計を行った。その内容は、送信電力の高出力化、指向性アンテナ、ボアホール型アンテナ、ノイズ対策などである。

今後、実験機の実用化を目指して開発を行うことにより地下構造、特に岩盤の含水状況の推定や、多量のデータ取得とスタッキングにより従来のパルスレーダーでは探査できなかった広範囲の探査が可能になると考えられる。

7. 参考文献

- (1) 阿部英太郎：マイクロ波技術，東京大学出版会(1979)
- (2) R. E. Collin：Antennas and Radiowave Propagation, McGraw-Hill (1985)
- (3) 電子情報通信学会編：レーダ技術，コロナ社(1984)
- (4) エレクトロニクス用語研究会編：図解エレクトロニクス用語辞典，日刊工業新聞社 (1988)
- (5) J. D. Kraus：Antennas (2nd Ed.), McGraw-Hill (1988)
- (6) 近藤次郎：フーリエ変換とその応用，培風館(1975)
- (7) 前田憲一，木村磐根：現代電磁波動論，オーム社(1984)
- (8) 松本欣二：電波工学入門，朝倉書店(1969)
- (9) 南茂夫：科学計測のための波形データ処理，CQ出版社(1986)
- (10) 岡田文明：マイクロ波工学，学献社(1993)
- (11) 大崎順彦；地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会(1976)
- (12) 桜井捷海，霜田光一：応用エレクトロニクス，裳華房(1984)
- (13) 霜田光一，桜井捷海：エレクトロニクスの基礎（新版），裳華房(1983)
- (14) 鈴木敬一：連続波を用いた電磁波調査機器の実験機の製作，核燃料サイクル開発機構契約業務報告書，JNC TJ7410 99-001(1999)
- (15) 鈴木敬一：連続波レーダー実験機を用いた基礎実験データの取得作業，核燃料サイクル開発機構契約業務報告書，JNC TJ7420 2000-007(2000)
- (16) 高橋秀俊：電磁気学，裳華房(1959)
- (17) G. Turner：Subsurface radar propagation deconvolution, Geophysics, Vol.59, pp.215～223(1994)
- (18) H. Zhou and M. Sato：Applications of vertical radar profiling technique to Sendai Castle, Geophysics, Vol.65, pp.533～539(2000)
- (19) <http://www.minicircuit.com>
- (20) <http://www.thamway.co.jp/>

巻 末 資 料

取得データ集

